

Caracterización geoelectrica de los perfiles de meteorización de
las rocas cristalinas en la zona de recarga y tránsito del acuífero
de Santa Fe de Antioquia en el municipio de Sopetrán, plancha
130-III-B4

Andrés Felipe Rosado Tapias
Luis Eduardo Salas Vargas



Departamento de Ciencias de la Tierra

Universidad EAFIT

Medellín

Noviembre de 2018

Caracterización geoelectrica de los perfiles de meteorización de
las rocas cristalinas en la zona de recarga y tránsito del acuífero
de Santa Fe de Antioquia en el municipio de Sopetrán, plancha
130-III-B4

Andrés Felipe Rosado Tapia
Luis Eduardo Salas Vargas

Proyecto de grado con el fin de cumplir los requisitos parciales para optar al grado
de Geólogo

Asesora:
Marcela Jaramillo Uribe (PhD)



Departamento de Ciencias de la Tierra
Universidad EAFIT
Medellín
Noviembre de 2018

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Medellín, 2018

Dedicatoria

En el presente trabajo rendimos tributo a nuestros padres: PAPÁS, por ser nuestros motores para la realización de nuestros sueños, por los principios y valores que nos inculcaron desde niños.

El presente trabajo está dedicado a todas las personas que participaron y colaboraron en la realización y culminación del proyecto de grado.

Agradecimientos

Agradecemos a la profesora Marcela Jaramillo Uribe (asesora de nuestro proyecto de grado), por habernos compartido todo su conocimiento y tiempo para la realización de este proyecto.

Agradecemos al ingeniero físico Juan Felipe Paschke por su disposición y voluntad de guiarnos en este proyecto.

Tabla de contenidos

1.	Introducción	10
2.	Generalidades	14
2.1	Objetivo general.....	14
2.2	Objetivos específicos	14
2.3	Preguntas de investigación.....	15
2.4	Hipótesis	15
3.	Metodología	15
3.1	Etapa de consulta	15
3.2	Etapa de precampo	17
3.3	Etapa de campo	18
3.4	Etapa de postcampo	18
4.	Zona de estudio	19
4.1	Localización.....	19
4.2	Geología.....	21
4.3	Geomorfología	23
5.	Prospección geofísica.....	28
5.1	Adquisición de datos.....	28
5.2	Procesamiento de los SEV y las TER	29
6.	Resultados y análisis	35
6.1	Depósitos Cuaternarios	36
6.2	Formación Amagá.....	38

6.3	Diorita de Heliconia.....	40
6.4	Formación Quebradagrande.....	42
6.5	Esquisto sericítico y grafitoso (Grupo Ayurá Montebello).....	44
7.	Discusión.....	48
8.	Conclusiones	51
9.	Recomendaciones.....	53
10.	Bibliografía.....	54
11.	Anexos.....	56
	Anexo 1	56
	Anexo 2	56
	Anexo 3	56
	Anexo 4	56
	Anexo 5	56
	Anexo 6	56
	Anexo 7	56

Listado de figura

Figura 1. Esquema general de las zonas de recarga y tránsito de un acuífero. Tomado de Escobar et al. (2017).	10
Figura 2. Modelos de perfiles de meteorización en diferentes condiciones. Tomado de Worthington et al. (2016).	11
Figura 3. Esquema del proceso metodológico. Elaboración propia.	16
Figura 4. Localización del área de estudio. Elaboración propia.....	20
Figura 5. Mapa geológico de la plancha 130IIB4 a escala 1:10.000. Modificada de SGC, 1984....	24
Figura 6. Mapa geomorfológico de la plancha 130IIB4 a escala 1:10.000. Elaboración propia realizada en la etapa de campo.	27
Figura 7. Localización de los SEV y TER.	28
Figura 8. Curva de resistividad aparente vs distancia de AB/2 del SEV 26. Elaboración propia.	30
Figura 9. Flujograma del procesamiento para los SEV. Elaboración propia.	31
Figura 10. Tomografía eléctrica resistiva, figura a. pseudosección datos aparentes, figura b. pseudosección teórica, figura c. Pseudosección resistividad real.....	31
Figura 11. Flujograma del procesamiento de las TER en el software RES2DINV. Elaboración propia.	34
Figura 12. Localización de TER y SEV (tomados de UNAL-Corantioquia 2004).....	35
Figura 13. Interpretación SEV 45, se observa las diferencias entre capas según compactación, saturación y granulometría. Elaboración propia. Datos de resistividad aparentes tomados de UNAL-Corantioquia (2004).	37
Figura 14. Pseudosección TER 10. Deposito cuaternario. Cada zona se encuentra descrita en Anexo 7.	38
Figura 15. Colinas representadas por la Formación Amagá y coloración del producto de meteorización de esta. Fuente Propia.	38
Figura 16. Interpretación SEV 39, secuencia típica de la formación Amagá. Elaboración propia. Datos de resistividad aparente tomados de UNAL-Corantioquia (2004).	39
Figura 17. Pseudosección TER 10. Perfil sobre la formación Amagá. Cada zona se encuentra descrita en el Anexo 7.	40
Figura 18. a. Gabro afectado por procesos de serpentización. b. Afloramiento de la Diorita de	

heliconia afectada por tectónica y gradando a gabro.Fuente propia.	40
Figura 19. Suelo residual de la diorita de heliconia correspondiente a un suelo grado V según Dearman (1995). Fuente propia.	41
Figura 20. Interpretación SEV 26. Secuencia asociada a la Diorita de Heliconia. Elaboración propia. Datos de resistividad aparente tomados de UNAL-Corantioquia (2004).....	42
Figura 21. Pseudosección TER 4. Perfil sobre la Diorita de Heliconia. Cada zona se encuentra descrita en el Anexo 7.	42
Figura 22. Intercalación de materiales volcánicos, formación Quebradagrande. Fuente propia.....	43
Figura 23. Pseudosección TER 3. Perfil sobre la formación Quebradagrande. Cada zona se encuentra descrita en el Anexo 7.	44
Figura 24. Figura a. Bloques de esquistos verdes compuestos por sericita y actinolita. Figura b. Bloques de esquistos grafitosos con budines de cuarzo. Fuente propia.....	44
Figura 25. Esquisto altamente meteorizado. Fuente propia.	45
Figura 26. Interpretación SEV 44. Secuencia de sedimentos seguida del basamento cristalino. Elaboración propia. Datos resistividad aparente tomados de UNAL-Corantioquia (2004).	46
Figura 27. Pseudosección TER 7. Perfil de meteorización Grupo Ayurá Montebello. Cada zona se encuentra descrita en el Anexo 7.....	47
Figura 28. Modelos de perfiles de meteorización en diferentes condiciones. Tomado de Worthington et al. (2016).	49

Listado de tablas

Tabla 1. Características de las unidades geológicas de la plancha 130-III-B4. Elaboración propia. 21
Tabla 2. Características geomorfológicas de la plancha 130 IIIB4 basados del Glosario de Términos geomorfológicos del SGC, (2015). Elaboración Propia.....
25
Tabla 3. Características de la adquisición para las TER. Elaboración propia.
29
Tabla 4. Características de la adquisición para las SEV. Tomado de UNAL-Corantioquia (2004). . 29
Tabla 5. Distribución de los SEV y las TER.....
35
Tabla 6. Tabla de resistividad absolutas para las unidades litológicas. Fuente propia.....
47
Tabla 7. Resistividades de las rocas sedimentarias, metamórficas y depósitos cuaternarios. Tomado de UNAL-Corantioquia (2004).
49

1. Introducción

Al hablar del recurso hídrico subterráneo, surgen dos conceptos imprescindibles que son conocimiento y gestión. Es necesario indagar acerca de la distribución, volumen, geometría y demás variables que afectan a un acuífero para hacer un uso adecuado del mismo. Esto es, precisamente, lo que se ha tratado de materializar a lo largo de los años en la región del Cauca Medio, donde se aprovecha tanto este recurso.

Las zonas de recarga y tránsito de un acuífero son piezas fundamentales en el estudio de las aguas subterráneas. Además, su definición espacial y temporal es clave para el conocimiento y protección de este valioso recurso. La recarga de un acuífero puede ocurrir mediante tres mecanismos principales: i) recarga directa por precipitación, ii) interacción con cuerpos de agua superficial y iii) flujos regionales (ver Figura 1) (Escobar, J., Betancur, T., García, E., Martínez, C., & Palacio, P. 2017). Estos autores indican, además, que las zonas de recarga dependen en mayor medida de la geomorfología (zonas de pendiente baja favorecen la retención y posterior infiltración del agua lluvia), así como de otros parámetros: distribución espacial, rasgos estructurales, coberturas, hidrografía, condiciones hidrometeorológicas y parámetros hidráulicos.

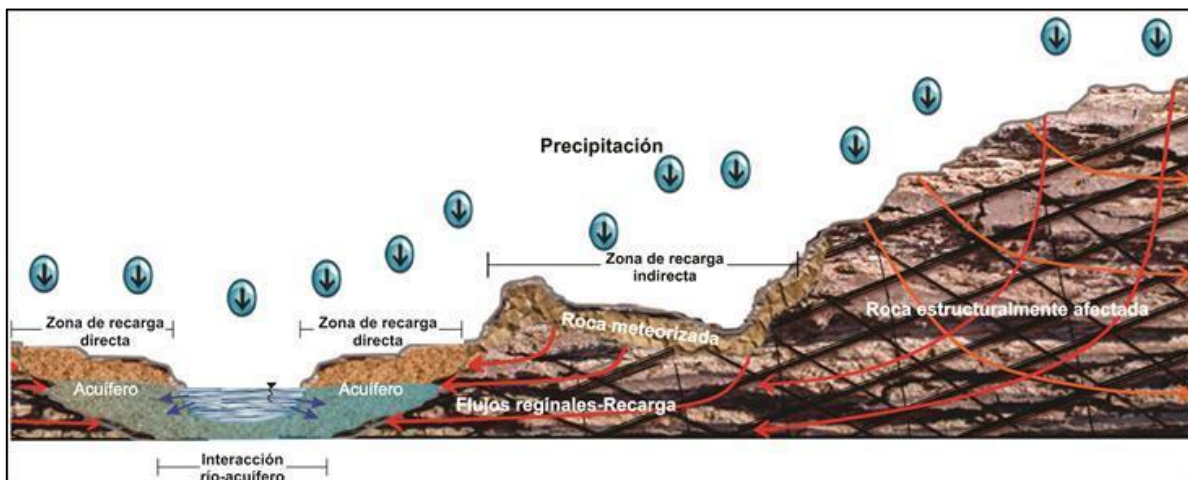


Figura 1. Esquema general de las zonas de recarga y tránsito de un acuífero. Tomado de Escobar et al. (2017).

Los flujos regionales involucran, a su vez, las rocas encajantes que, por lo general, son

rocas cristalinas. Éstas, a pesar de no representar un potencial acuífero alto (UNAL-Corantioquia, 2004), pueden constituir importantes zonas de recarga y tránsito debido al desarrollo de porosidades y permeabilidades secundarias como resultado de meteorización química (Worthington S. R. H., Davies, G. J., & Alexander, E. C. 2016).

Está comprobado que la meteorización afecta el estado de porosidad y permeabilidad original de una roca y que la tasa a la que sucede esto depende del tipo de litología (Worthington et al., 2016). Cuando la meteorización ocurre a través de fracturas, puede alcanzar niveles muy profundos y actuar de manera muy eficiente hasta crear redes de fracturas interconectadas que favorecen la permeabilidad del macizo rocoso. Como resultado de esto, se generan perfiles de meteorización semejantes a los que se presentan en la Figura 2. Worthington plantea 4 perfiles idealizados por los procesos de meteorización en 4 litologías, el perfil tipo c corresponde a un macizo rocoso en el que la meteorización es congruente (disolución de la roca que genera ácidos), cuando esto pasa, los fluidos que contienen ácidos ayudan a que se creen redes de fracturas por medio de la disolución.

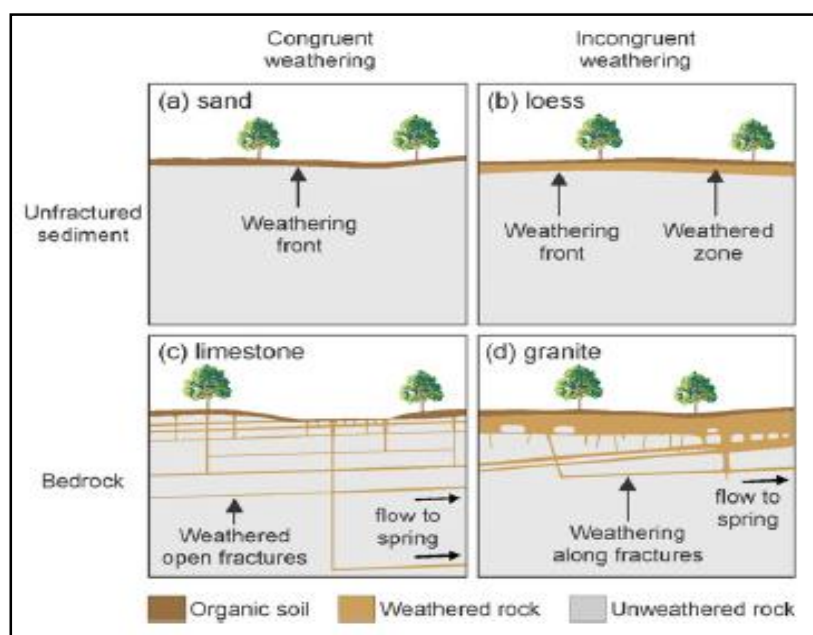


Figura 2. Modelos de perfiles de meteorización en diferentes condiciones. Tomado de Worthington et al. (2016).

El perfil tipo d se da cuando la meteorización es incongruente (disolución de la roca que

produce residuos sólidos) y, por ende, se genera un saprolito en la parte superficial, seguido en profundidad del desarrollo de redes de fracturas por disolución.

La caracterización de estas zonas de recarga y tránsito puede hacerse bien sea a través de levantamiento geológico, o bien sea mediante la utilización de métodos indirectos como la geofísica enfocada en resistividades eléctricas. La resistividad es un concepto físico inverso a la conductividad y, por ende, esta incrementa cuando el medio no tiene propiedades metálicas o intersticios en los cuales contenga agua con iones capaces de conducir la corriente eléctrica (Loke, 1999). Mediante la adquisición de datos de resistividades aparentes del subsuelo es posible hacer un perfil geoelectrico donde se observen las variaciones laterales de resistividad y, así, inferir información relevante de las propiedades del medio tales como: porosidad, discontinuidades, saturación, profundidad del basamento, condiciones del suelo, entre otras (Kearey P., Brooks, M., Hill, I. 2002).

En el 2010 el IDEAM llevó a cabo el Estudio Nacional del Agua (ENA), estudio técnico-científico donde se reconoció por primera vez el estado y la dinámica del agua a nivel nacional. Este estudio subdividió el país en 16 provincias hidrogeológicas (PHG), que fueron caracterizadas asociándolas a las principales cuencas sedimentarias de Colombia, establecidas en 2007 por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). Adicionalmente, se definieron áreas de poca importancia hidrogeológica a nivel nacional denominadas basamento acuífuga y altos estructurales, caracterizados por ser impermeables. En el ENA 2014 (IDEAM, 2015), se realizó una clasificación hidrogeológica de mayor refinamiento, donde se identificaron 61 sistemas acuíferos (SA) en el territorio nacional. En este documento se define SA como “dominio espacial limitado en superficie y profundidad, en el que existen uno o varios acuíferos con porosidad primaria o secundaria, relacionados o no entre sí, pero que constituyen una unidad práctica para la investigación o explotación” (ITGE, 1971,1987; WMO, 2012 citados en IDEAM 2013).

En la jurisdicción de Corantioquia, se encuentra el Sistema Acuífero de Santa Fe de Antioquia (SAM6.4), definido en el ENA de 2010, como basamento impermeable (IDEAM, 2015). Este sistema acuífero se encuentra localizado en la depresión Cauca Patía, entre las cordilleras Central y Occidental, en sedimentos aluviales del río Cauca, al occidente del

departamento de Antioquia (Colombia). El sistema acuífero comprende los municipios de Liborina, Olaya, Santa Fe de Antioquia, San Jerónimo y Sopetrán, En este último municipio se realizó el estudio del presente trabajo.

El SA de Santa Fe de Antioquia es de tipo libre, con 103 km² de área superficial, y se compone de depósitos aluviales del río Cauca, materiales de ríos tributarios y depósitos de vertiente. Geomorfológicamente, se encuentra en la unidad Cañón del Río Cauca. Este SA posee 3 unidades hidrogeológicas: i) la UHG-1, compuesta por depósitos aluviales y de vertiente, ii) la UHG-2 que comprende depósitos aluviales de drenajes secundarios, y iii) la UHG-3 que se compone de rocas sedimentarias terciarias, ígneas y metamórficas y se considera de bajo potencial acuífero (SHI, 2015). Este recurso hídrico es de vital importancia en el área, ya que el régimen de lluvias es deficiente incluso cuando no hay influencias de la fase cálida del ENSO en Colombia (Durán-Quesada, A. M., Reboita, M., & Gimeno, L. 2012).

Varias instituciones han aunado esfuerzos a lo largo de varios años para aportar al conocimiento hidrogeológico del área de estudio, incluyendo datos geoeléctricos. Entre los trabajos orientados a conocer el potencial acuífero de este SA, se destacan tres contratados por Corantioquia: el primero de ellos lo realizó la Universidad Nacional de Colombia en el 2004 y se titula “Evaluación del Potencial Acuífero en los Municipios de Santa Fe de Antioquia, San Jerónimo, Sopetrán, Olaya y Liborina” (UNAL-Corantioquia, 2004); el segundo es el que llevó a cabo Servicios Hidrogeológicos Integrales S.A.S. (SHI) en el 2015 (SHI-Corantioquia, 2015), y que llevar por nombre “Diagnóstico para la formulación del Plan de Manejo Ambiental del Sistema Acuífero del Occidente Antioqueño en la territorial Hevéxicos de corantioquia”; por último el tercero fue realizado por Gotta Ingeniería S.A.S. en el 2017 y se tituló “Evaluación Regional del Agua –ERA– en jurisdicción de Corantioquia” (Gotta-Corantioquia, 2017).

En el estudio de UNAL-Corantioquia (2004) se llevó a cabo una campaña de adquisición de datos de resistividad por medio de 96 sondeos eléctricos verticales (SEV). El estudio reporta resistividades muy bajas para las rocas cristalinas (20-30 ohm-m en esquistos), las cuales, por lo general, deberían arrojar valores altos de resistividad (1500-5000 ohm-m;

UNAL, 2000). Según la ERA de 2017, estos valores reportados para rocas cristalinas estarían indicando debilidades en la interpretación de los resultados de los SEV.

Una hipótesis para explicar estas anomalías en las resistividades está relacionada con la meteorización química que afecta a las rocas cristalinas en el área de estudio. Sin embargo, en la zona de estudio, no hay información clara sobre el perfil de meteorización del basamento cristalino, en este caso, del Grupo Ayurá Montebello y Diorita de Heliconia; lo cual sería útil para el entendimiento del rol que estas rocas juegan en el sistema acuífero de Santa Fe de Antioquia como zonas potenciales de recarga y tránsito de (y hacia) los acuíferos aluviales.

El presente estudio tiene como objetivo la caracterización de los perfiles de meteorización de las rocas cristalinas en la zonas de recarga y tránsito del acuífero de Santa Fe de Antioquia en el municipio de Sopetrán. Lo anterior se hizo mediante la descripción en campo de los materiales que conforman los saprolitos de las rocas cristalinas y la adquisición de datos geoelectrónicos en formato TER (Tomografías Eléctricas de Resistividad) y una actualización en la interpretación de los datos de SEV ya existentes, tomados de UNAL-Corantioquia (2004). Esto con miras a entender los cambios de la permeabilidad de los cuerpos rocos que han sido afectados por los procesos de la meteorización química.

2. Generalidades

2.1 Objetivo general

Entender el papel que juega la meteorización química en las permeabilidades de las rocas cristalinas que constituyen las zonas de recarga y tránsito del acuífero de Santa Fe de Antioquia, a través de la caracterización de sus perfiles de meteorización utilizando la geología y los métodos geofísicos basados en resistividad eléctrica.

2.2 Objetivos específicos

- Recopilar y analizar la información secundaria geológica e hidrogeológica disponible sobre la zona de estudio y sobre los métodos geofísicos basados en resistividad eléctrica.

- Realizar campañas de campo con la finalidad de recopilar información primaria de los perfiles de meteorización, geología, geomorfología y geoeléctrica.
- Organizar y analizar la información geofísica, con el fin de llevar a cabo el procesamiento e inversión de los datos, y así obtener los perfiles geoeléctricos en las zonas de interés.
- Interpretar los perfiles geoeléctricos de las TER, y actualizar la interpretación de los SEV disponibles atendiendo a la información geológica y caracterizar los perfiles de meteorización de las rocas cristalinas que afloran en la zona de estudio en términos de permeabilidades secundarias.

2.3 Preguntas de investigación

¿Los bajos valores de resistividad de las rocas cristalinas en la zona que han sido reportados en estudios anteriores están relacionados con los procesos de meteorización química?

¿Cómo afecta la meteorización en la permeabilidad de las rocas cristalinas para ser condicionadas como zonas de recarga potencial?

2.4 Hipótesis

Las litologías cristalinas en la zona de estudio presentan comportamientos similares a rocas sedimentarias en términos de resistividad eléctrica, debido a procesos de meteorización que, a su vez, facilitan la infiltración de agua para la potencial recarga indirecta por precipitación del acuífero.

3. Metodología

El proceso metodológico se dividió en 5 etapas: consulta, precampo, campo, postcampo y, por último, trabajo escrito, las cuales se presentan en la Figura 3 y serán descritas con detalle a continuación.

3.1 Etapa de consulta

Se realizó la búsqueda de información bibliográfica, tanto digital como física, con énfasis en bases de datos de entes gubernamentales, tales como la Corporación Autónoma Regional de

Antioquia (CORANTIOQUIA), Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) e Instituto de Hidrogeología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Además, se hizo uso de las investigaciones realizadas por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (UNAL), y por empresas privadas en convenio con CORANTIOQUIA.

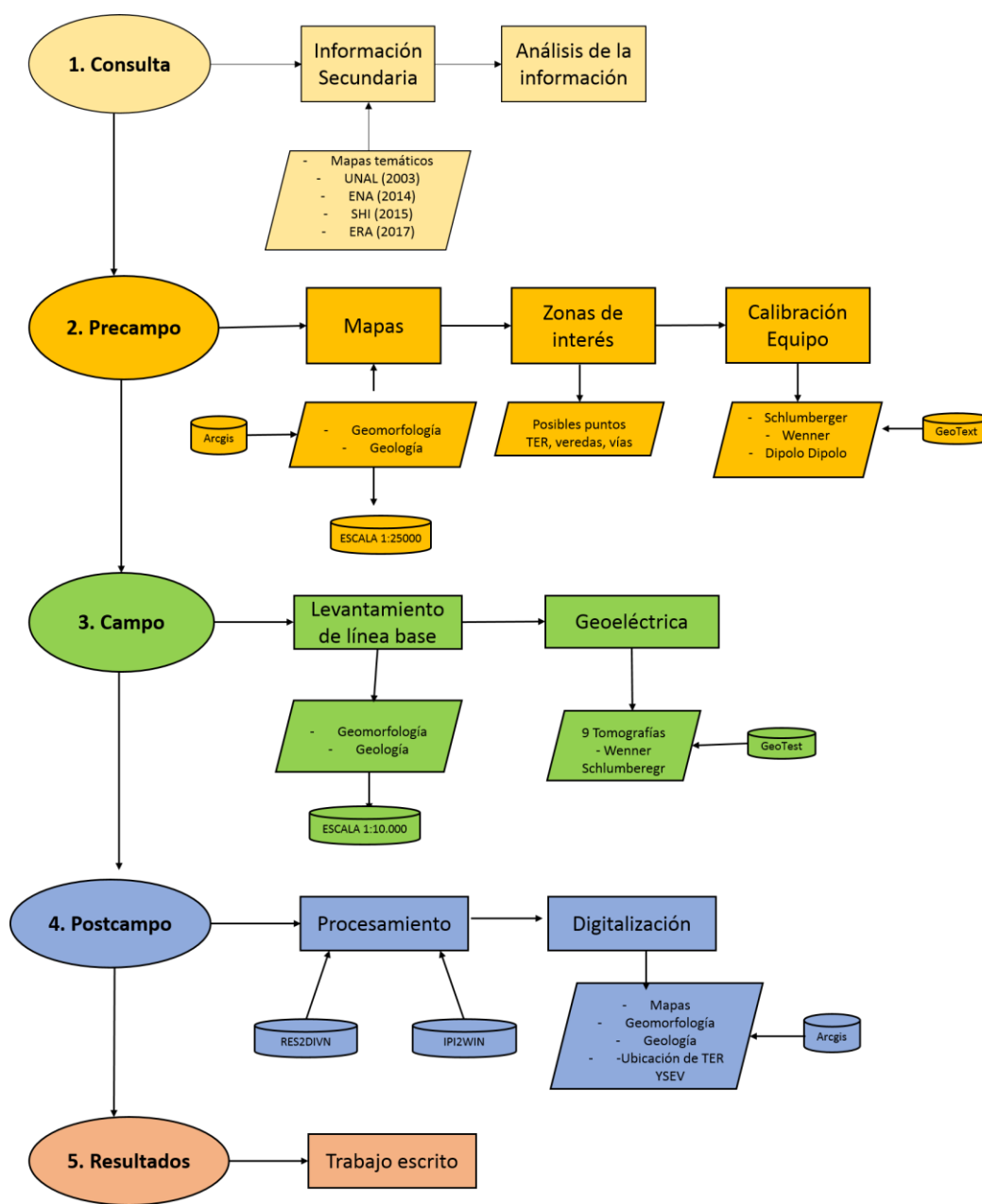


Figura 3. Esquema del proceso metodológico. Elaboración propia.

De la información recopilada, se analizó principalmente la información los siguientes estudios debido a la pertinencia de sus temáticas: 1) “Evaluación del Potencial Acuífero en los Municipios de Santa Fe de Antioquia, San Jerónimo, Sopetrán, Olaya y Liborina” realizado por el Instituto del Agua de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, en el año 2004; 2) “Estudio Nacional del Agua” elaborado por el IDEAM en el año 2010 y su actualización en el 2014; 3) “Diagnóstico para la formulación del Plan de Manejo Ambiental del Sistema Acuífero del Occidente Antioqueño en la territorial Hevéxicos de Corantioquia” preparado por la empresa Servicios Hidrogeológicos integrales S.A.S. (SHI) en 2015; 4) “Evaluación Regional del Agua en jurisdicción de Corantioquia” elaborado por la empresa Gota Ingeniería S.A.S.

Adicionalmente, se utilizó la plancha geológica 130 (escala 1:100.000) del municipio de Santa Fe de Antioquia, elaborada por INGEOMINAS (actualmente Servicio Geológico Colombiano) en el año 1983 y la plancha topográfica 130-III-B4 del municipio de Sopetrán (escala 1:10.000) del año 2014 elaborada por el IGAC. También se contó con información SIG de la Geodatabase (GBD) Cartobase de Antioquia, a escala 1:25.000, hecha por Corantioquia y la GBD de la plancha topográfica 130-III-B4, suministrada por el IGAC. Finalmente, se revisaron los datos geofísicos de la zona de interés que se encuentra en los textos base.

3.2 Etapa de precampo

Se determinaron los puntos de interés para la aplicación de las Tomografías Eléctricas Resistivas (TER). Para ello se tuvo en cuenta la presencia de cuerpos rocosos cristalinos, la topografía, las vías de acceso, la información secundaria de Sondeos Eléctricos Verticales (12 en su totalidad) de UNAL-Corantioquia (2004), la geología estructural y la geomorfología.

Una vez definidas las zonas de interés, se procedió a precisar el tipo de arreglo y la distribución espacial de los electrodos para la toma y adquisición de datos. Se procedió luego a elaborar mapas temáticos de unidades geológicas y geomorfológicas a una escala 1:25.000, acudiendo para ello a la información secundaria, con miras a efectuar las salidas de campo para adquisición de información primaria.

Adicionalmente, se calibró el equipo de geoeléctrica (4 point Light 10w, marca Lippmann Geophysical Equipment). La calibración consistió en la adquisición de datos geoeléctricos en dos líneas ubicadas en cancha de grama del campus principal de la Universidad EAFIT en Medellín y en la sede Llanogrande. Adicionalmente, los datos se sometieron a constante revisión en campo mediante el levantamiento geológico de afloramientos.

Finalmente se aprendió a utilizar el programa Geotest incluido con el equipo. Este software permite controlar equipos geoeléctricos en combinación con muchos electrodos, usando técnicas de inversión bidimensional o tridimensional para dar resultados como las tomografías geoeléctricas. El equipo utilizado es propiedad de la Universidad EAFIT.

3.3 Etapa de campo

Se realizaron 4 salidas de campos efectuadas en julio y agosto de 2018. En la primera salida se realizó el reconocimiento de la zona de estudio, se analizó el estado de las vías y los afloramientos presentes, se definieron los sitios para la realización de las TER, se reconocieron los lugares donde se realizaron los SEV. Adicionalmente, se hizo un levantamiento de la línea base, consistente en la descripción de afloramientos, perfiles de meteorización y geomorfología para ser digitalizada (el informe de la salida de campo levantamiento línea base Anexo 1 digital y el informe completo de la salida de campo de geofísica en el Anexo 2, también digital). En la segunda, tercera y cuarta salida se llevó a cabo la ejecución de los ensayos geofísicos, consistentes en 9 tomografías eléctricas resistivas (TER) con arreglo Wenner-Schlumberger, con separación de 2.5, 4 o 5 m entre los electrodos permitiendo tener una sensibilidad vertical como lateral (el informe completo de las salidas de campo para adquisición geofísica se presenta en el Anexo 3 digital). Además, se utilizaron 2 TER realizadas durante la asignatura de Geología de Campo II en el semestre 2017-2.

3.4 Etapa de postcampo

En esta etapa se llevó a cabo el procesamiento y análisis de la información obtenida en campo. Para el procesamiento de los datos obtenidos de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) se utilizó el software IPI2Win (MT) v.2.0 de uso libre, elaborado por la Universidad Estatal de Moscú, Facultad de Geología, Departamento de Geofísica, en el año 2002. Este software se puede ejecutar en cualquier ordenador con sistema Windows y está diseñado para

la interpretación automatizada e interactiva de datos de sondeos eléctricos resistivos utilizando la amplitud de las curvas de fase (curvas de campo vs. curvas teóricas), permitiendo una interpretación de las resistividades (Geoscan-M Ltd, 2002).

Para las Tomografías Eléctricas Resistivas (TER) se empleó el software RES2DINVx64 ver.4.07, fabricado por la empresa GEOTOMO SOTWARE en el año 2017, licencia suministrada por la Universidad EAFIT, que permite realizar modelos automáticamente bidimensionales de resistividad para el subsuelo en los arreglos wenner, wenner-schlumberger, dipolo-dipolo, polo-dipolo, entre otros, utilizando diferentes modelos de inversión. El software se puede ejecutar en cualquier ordenador con sistema Windows Xp, Vista, 7, 8 y 10 (Software y Heights, 2014). Para mayor información de las metodologías del procesamiento leer el capítulo 5.2 Procesamiento de los SEV y las TER

Adicional al procesamiento de los datos, se digitalizaron los mapas levantados en campo como geología, geomorfología, ubicación de las líneas TER y los puntos de los SEV empleando el software Arcgis 10.5 (los mapas se presentan en el Anexo 3).

Con el procesamiento de los datos se procedió a generar perfiles geoeléctricos, para posteriormente ser analizados, interpretados y caracterizados, acudiendo para ello a la asesoría de los expertos, para así generar los resultados que se consignan en el presente trabajo.

4. Zona de estudio

4.1 Localización

El estudio se realizó en jurisdicción del municipio de Sopetrán, localizado en el centro occidente del departamento de Antioquia, en la plancha topográfica 130-III-B4 (Municipio de Sopetrán), elaborada por el IGAC en el año 2014 a escala 1:10.000, la cual tiene un área aproximada de 37,54 km² (ver Figura 4).

La zona de estudio se enmarca en la Subregión occidental de Antioquia y corresponde a un tramo del cañón del río Cauca, en inmediaciones de lo que se conoce como la depresión

intramontana Cauca-Patía. Se ubica entre la vertiente occidental de la cordillera Central y la vertiente oriental de la cordillera Occidental. El municipio de Sopetrán se encuentra a 40 km de Medellín y limita al norte con el municipio de Olaya, al occidente con el municipio de Santa fe de Antioquia, al este con Belmira y al sur con San Jerónimo y Ebéjico.

El área de estudio se encuentra dividida territorialmente en cuatro corregimientos: 1) Córdoba, localizado al noroccidente de la cabecera municipal de Sopetrán, conformado por las veredas Las Ciruelas, Miranda, Alta Miranda, Santa Rita y el área urbana de Córdoba; 2) Guayabal, localizado en la serranía de Guayabal, al occidente de la cabecera municipal cuenta con las veredas Rojas, Pomos, Chachafruto y Palenque; 3) parte de la zona urbana de Sopetrán al sur de la cabecera municipal y vereda El Rodeo; 4) Nuevos Horizontes, localizado al nororiente del municipio, del que se destaca la vereda Montegrande.

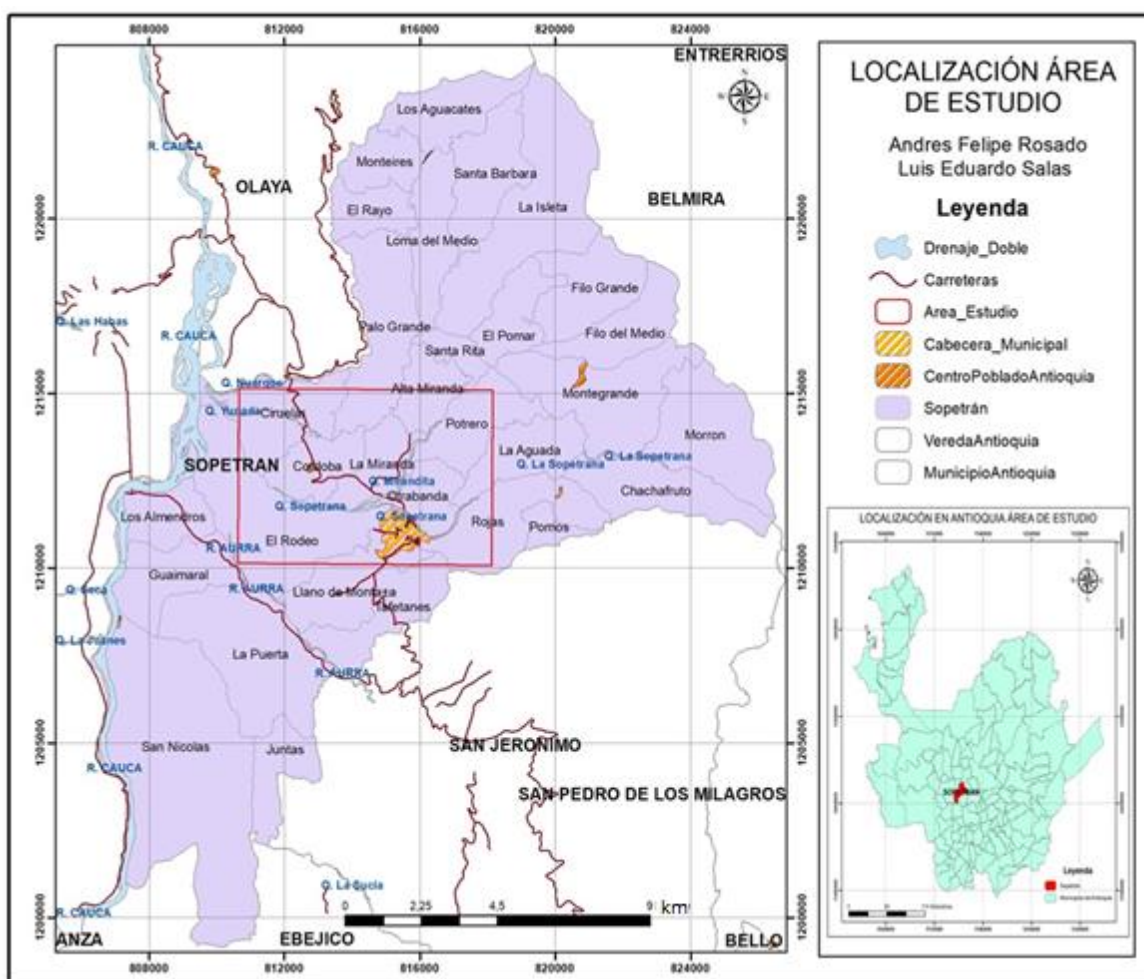


Figura 4. Localización del área de estudio. Elaboración propia.

4.2 Geología

En la zona de estudio afloran rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, además de depósitos coluviales y de vertiente, según la plancha 130 de Santa fe de Antioquia a escala 1 en 100.000 de INGEOMINAS. En el costado este del área de estudio afloran las rocas metamórficas denominadas Grupo Ayurá Montebello, que se compone de esquistos verdes (Pev) y esquistos sericíticos (Pes). En el costado norte se encuentran las rocas ígneas representadas por las formaciones Quebradagrande-miembro volcánico (aglomerados), Anfibolitas de sucre (anfibolitas) y Diorita de Heliconia (Doritas-Horbléndicas). Estas rocas presentan un alto grado de meteorización y fracturamiento debido a los procesos químicos y físicos (falla Cauca Romeral). En la zona central y sur se encuentran las rocas sedimentarias correspondientes a la Formación Amagá con sus tres miembros (Superior-Medio e Inferior), la Formación Combia y los depósitos fluviales de la quebrada La Sopetrana.

A continuación, se presenta una breve descripción de las unidades geológicas que aparecen en la plancha 130-III-B4 (ver Tabla 1) y el mapa geológico escala 1:10.000 (ver Figura 5) basados en la memoria explicativa de la plancha 130, 1984.

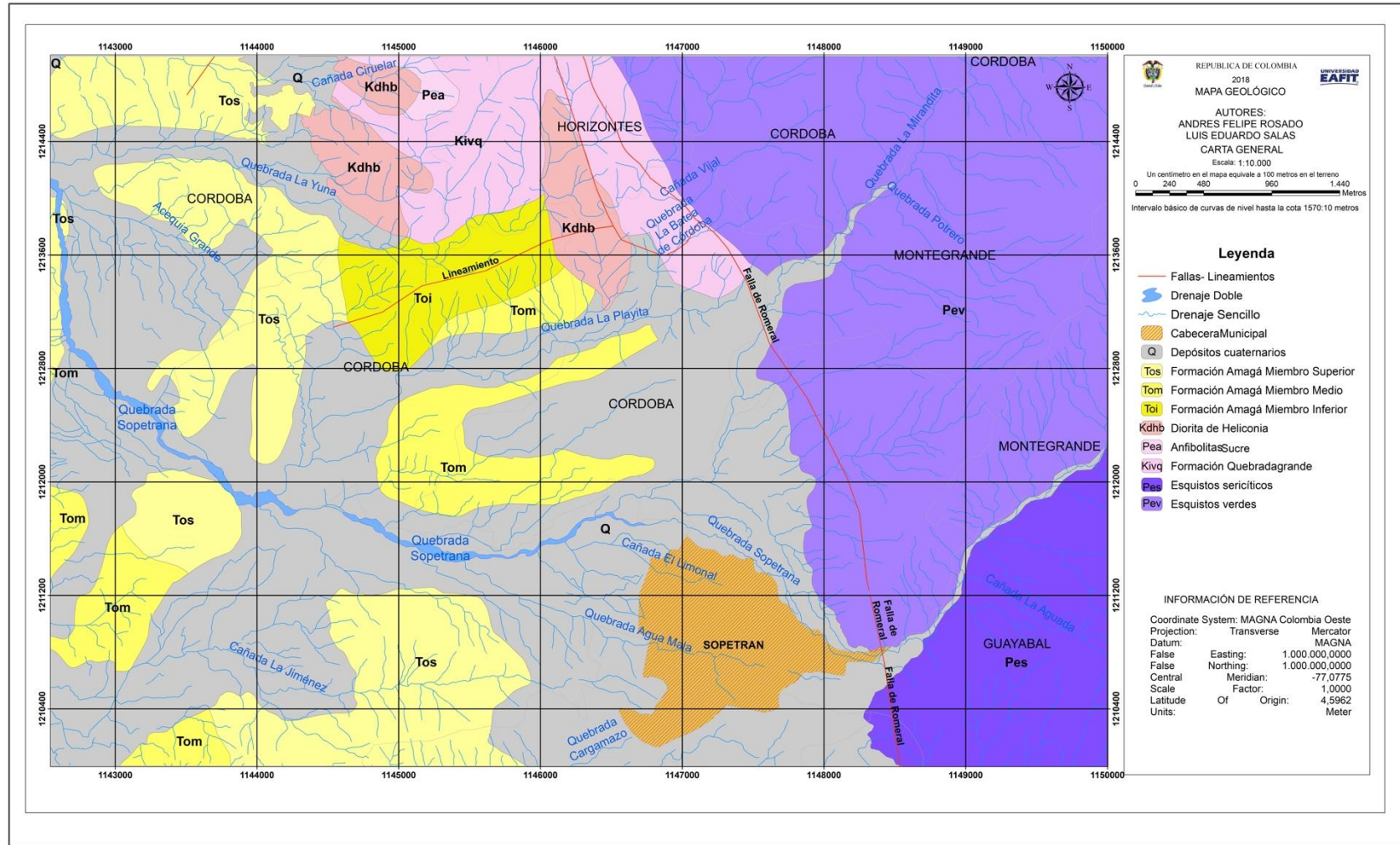
Tabla 1. Características de las unidades geológicas de la plancha 130-III-B4. Elaboración propia.

Unidad Geológica	Descripción	Localización
Depósitos Cuaternarios (Q)	Depósitos fluviales clasto-soportados de gravas en una matriz arenosa fina, con depositación caótica y mala selección. Depósitos de vertiente, compuestos por bloques muy alterados de la geología circundante en una matriz arenosa.	Se localizan en el sector sur y central del área de estudio.
Formación Amagá Miembro Superior (Tos)	Compuesta por areniscas de grano fino a grueso, de color beige, con buena selección y baja porosidad.	Se distribuyen en la totalidad del margen oeste de la zona estudio, aflorando en la vereda El Rodeo.
Formación Amagá Miembro Medio (Tom)	Areniscas de color beige, con buena selección, con lentes de lodolita grisácea embebida en los estratos de la arenisca. En campo no se observaron lentes de carbón. Se divide del miembro inferior utilizando la información secundaria.	Se localizan en el sector central y sur-oeste de la zona de estudio, aflorando en la vereda El Rodeo.

Unidad Geológica	Descripción	Localización
Formación Amagá Miembro Inferior (Toi)	Arenisca de color beige, con una madurez textural en la morfología de los clastos y empaquetamiento en una matriz bien cementada. Se del mimbrio medio utilizando la información secundaria.	Se localizan en el sector central del área de estudio, aflorando en la vereda El Rodeo.
Diorita de Heliconia (Kdhb)	Diorita de composición intermedia, gran porcentaje de máficos (hornblenda), se observa contenido de feldespatos. A lo largo de las discontinuidades se observa serpentización. Se identifican suelos residuales con espesores de 5m, de color 10YR(8/3) según Munsell, de material arenoso permeable y seco, correspondiente al horizonte V según Dearman (1995)	Se localizan en el norte del área de interés, aflorando en el corregimiento de Horizontes.
Anfibolita de Sucre (Pea)	De composición mayormente máfica (hornblenda 90%), con granos de tamaños homogéneos entre los que se destaca también la plagioclasa. Entre los planos de debilidad es claro el proceso de serpentización. Se encuentran bloques caídos.	Se localizan en el norte del área de interés, aflorando en el corregimiento de Horizontes.
Formación Quebradagrande (Kivq)	De composición máfica, con tamaño de grano muy fino, volcánica con coloración de mineral verde como olivino y epidota, clasificada como basalto. Además se observan aglomerados con una matriz verdosa. Desarrolla suelos de un espesor de 2 metros, de granulometría arenosa, clasificados según Dearman (1995) como horizontes grado V	Se localizan en el norte del área de interés, aflorando en el corregimiento de Horizontes.
Esquistos Verdes (Pev)	Esquistos de color verde compuestos por clorita y actinolita. Se identifican suelos de granulometría arcillosa, clasificados según Dearman (1995) como grado IV.	Se localizan en el costado este de la zona de estudio, aflorando en los corregimientos de Montegrande y Horizontes.
Esquistos Sericiticos (Pes)	Esquistos grafitosos y micáceos con presencia de micas y budines de cuarzo altamente deformados donde se evidencian pliegues. Se observan perfiles de suelo clasificados según Dearman (1995) como horizontes grado III. Éstos se encuentran secos, con granulometría arcillosa- limosa, de color 8/6 10YR (beige) según Munsell, con algunas variaciones a rojizos por oxidación, además se perciben lavados de grafito	Se localizan en el sector sureste de la zona de estudio, aflorando en el corregimiento de Guayabal.

4.3 Geomorfología

La geomorfología del área de estudio está enmarcada en tres unidades genéticas de relieve compuestas por los ambientes Denudacional, Estructural y Fluvial. El primer ambiente corresponde a morfologías definidas por la acción de los procesos de meteorización y erosión, el segundo es originado por la dinámica de los esfuerzos de la tierra representados en las fallas y el tercero incluye las geoformas creadas por los procesos de erosión de las corrientes superficiales y la acumulación de los sedimentos que estas transportan (SGC, 2015). En la Figura 6 se muestra el mapa geomorfológico escala 1:10.000 y en la Tabla 2 se presenta la descripción detallada de las unidades genéticas y de las geoformas basados en el Glosario de Términos geomorfológicos del SGC, (2015).



HOJA No. 130IIIB4

Figura 5. Mapa geológico de la plancha 130IIIB4 a escala 1:10.000. Modificada de SGC, 1984.

Tabla 2. Características geomorfológicas de la plancha 130 IIIB4 basados del Glosario de Términos geomorfológicos del SGC, (2015). Elaboración Propia.

Código	Unidad Genética de Relieve	Unidad Geomorfológica	Descripción de las Geoformas	Ubicación
Del	Denudativa	Ladera erosiva	Unidad conformada por una superficie de forma ondulada, con cimas alargadas de filos alargados. La unidad presenta una alta incisión con pendientes escarpadas entre 30-50%, con longitudes largas (350 m), con alturas aproximadas de 1100 msnm	Localizada en el corregimiento de Guayabal, sector sureste de la zona de estudio.
Dlo		Ladera Ondulada	Unidad compuesta por morfología alomada, con cimas cóncavas y cerros aislados, con pendientes muy escarpadas >55%, de longitudes largas (250 m), con alturas aproximadas entre 1200 a 1300 msnm	Localizada en el corregimiento de Montegrande y Guayabal, en el sector este de la zona de estudio
Dmo		Montículos y ondulaciones denudativas	Caracterizados por un sistema de colinas (montículos) redondas a subredondas, con una base amplia, topes redondeados, con laderas planas a e irregulares, con pendientes escarpadas entre 30-50%, de longitudes entre 100 a 25 9m, con alturas entre los 550 a 650 msnm.	Localizada en el corregimiento de El Rodeo y la cabecera municipal de Sopetrán.
Sces	Estructural	Sistema de colinas con control estructural	Compuesta por un sistema de colinas con cimas redondeados y angostas, con laderas planas. Presentan un control estructural con dirección de N70E, con pendientes escarpadas entre 30-50%, con longitudes entre 100 y 150 m, con alturas entre los 650 a 700 msnm.	Localizado en el corregimiento de Horizontes, en el sector norte de la zona de estudio.
Ssh		Sierra homoclinal	Esta unidad presenta una morfología colinada de cimas alargadas, con pendientes escarpadas entre 30-50%, con longitudes de 600 m y con alturas entre los 600 y 700 msnm	Localizada en la cabecera municipal de Sopetrán, en el sector sur de la zona de estudio.
Sgr		Ganchos de flexión	Esta unidad presenta un control estructural observado por el cambio de dirección de los filos de norte a N55°E, deflectando al oeste. Compuesta por filos cóncavos alargados, con cimas angostas, de morfología alomada, con pendientes muy escarpadas >55%, con longitudes cortas a moderadas (200 m), con altura aproximada de 880 msnm.	Localizados en el corregimiento Horizontes, en el sector norte de la zona de estudio.

Código	Unidad Genética de Relieve	Unidad Geomorfológica	Descripción de las Geoformas	Ubicación
Faa		Abanico Aluvial	Unidad compuesta por formas cóncavas, con laderas de morfología planas, aterrazada. Se forman por la acumulación torrencial y fluvial de sedimentos, donde una corriente transporta estos y lo deposita de forma radial, de pendientes moderadas 10-30%, con una longitud de 4,5 km y una altura aproximada de 570 msnm.	Localizado en la cabecera municipal de Sopetrán. Sector sureste de la zona de estudio.
Fca	Fluvial	Cauce Aluvial	Cauce aluvial de la quebrada La Sopetrana. Cauce con energía media, de pendientes suaves, de forma recta a semimeándrica, con sentido sureste-noreste, con poca incisión del canal, con caudales bajos, de pendientes suaves entre 4-8%. El cauce presenta una altura de 470 msnm en el curso medio (observado en campo).	Desde el corregimiento de Guayabal, pasando por la cabecera municipal de Sopetrán hasta la vereda El Rodeo. Sector sureste a noroeste de la zona de estudio.
Fea		Escarpe de Abanico Aluvial	Superficie originada por la incisión y profundización del cauce aluvial, formando planos verticales con longitudes cortas, con escalamientos. Presenta pendientes escarpadas, entre 30-60% y alturas variadas entre 670 y 720 msnm.	Se presentan cerca de la cabecera municipal de Sopetrán.
Fta		Terrazas de Acumulación	Superficies limitadas por los escarpes de erosión a diferentes alturas a lo largo del cauce de la quebrada La Sopetrana. Compuestas por unidades alargadas, de forma semiondulada. Se originan por la acumulación y erosión del cauce. Presenta pendientes suaves, entre 4-8%, con alturas aproximadas de 490 msnm.	Se localizan por la cabecera municipal de Sopetrán y la vereda El Rodeo. Sector central y noroeste de la zona de estudio.

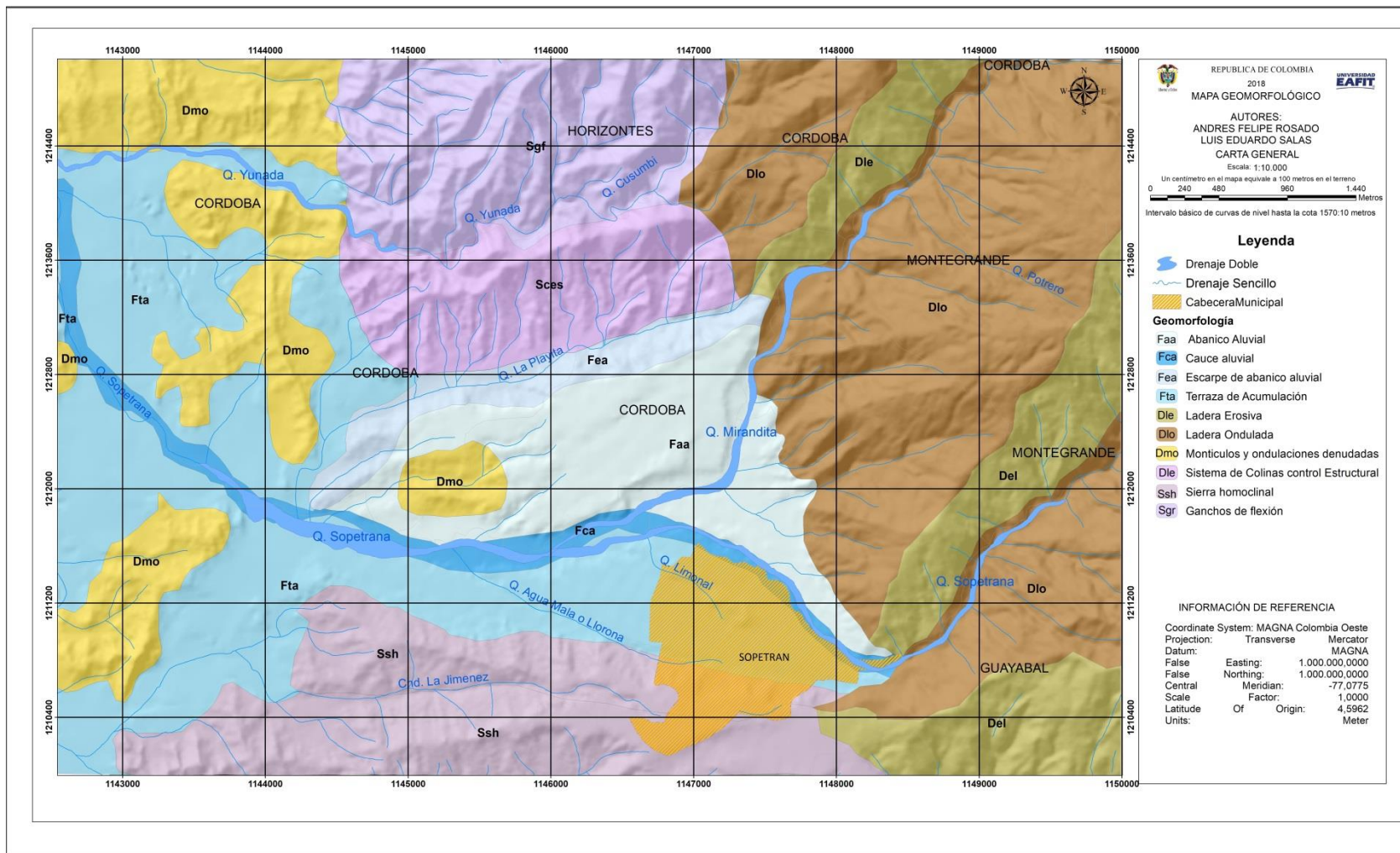


Figura 6. Mapa geomorfológico de la plancha 130IIIB4 a escala 1:10.000. Elaboración propia realizada en la etapa de campo.

5. Prospección geofísica

5.1 Adquisición de datos

En aras de llevar a cabo el desarrollo del proyecto, se realizó la adquisición de datos geoelectricos en el área de estudio (Anexo 2). Los puntos de interés (ver Figura 7) representan áreas donde se registra geología cristalina, que son zonas de tránsito y recarga del acuífero de Santa Fe de Antioquia. Además, estas, son unidades geomorfológicas de mayor altura, es decir, el régimen topográfico más prominente, por lo que muchas líneas incluyen topografía.

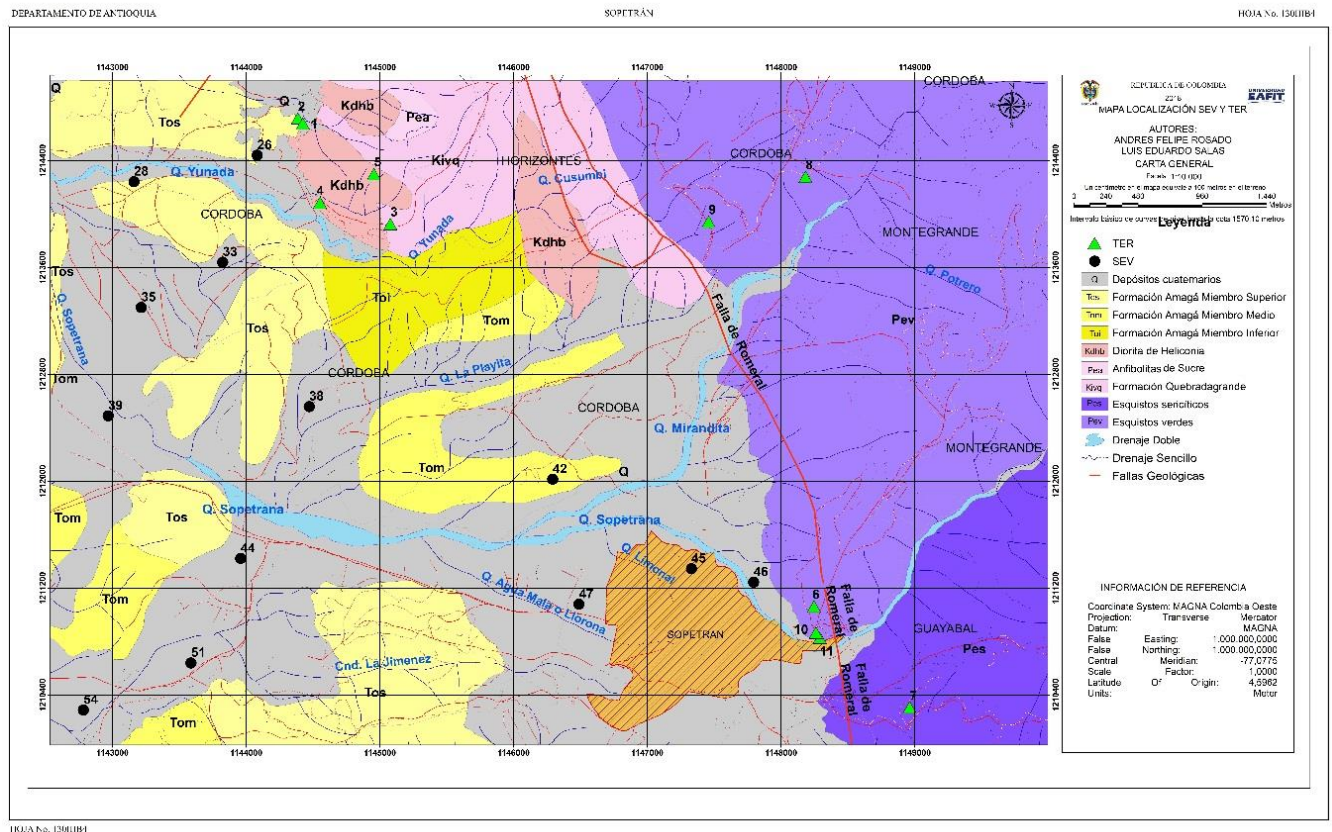


Figura 7. Localización de los SEV y TER.

La geometría utilizada durante la adquisición de los datos fue el método Wenner-Schlumberger, ya que comparte bondades de ambos métodos involucrados, es decir, provee una profundidad de investigación óptima y, además, posee una buena cobertura de datos en la vertical y horizontal, por lo que registra bien los cambios en resistividad (Loke, 1999).

En las Tabla 3 y 4 se presentan las características de adquisición como las coordenadas, altura, rumbo, longitud para las TER y los SEV.

Tabla 3. Características de la adquisición para las TER. Elaboración propia.

N°_TER	Norte (m)	Este ^a (m)	Altura (msnm)	Longitud (m)	N° de electrodos	Espaciado (m)	N° de datos	Rumbo
1	1214783	1144375	570	185	38	5	531	S20° E
2	1214784	1144376	577	75	15	5	60	S50 W
3	1213925	1145034	754	104	26	4	226	S 90 E
4	1214088	1144541	603	75	15	5	60	S 20 E
5	1214302	1144954	738	75	30	2,5	315	N 55 E
6	1211031	1148204	898	75	30	2,5	365	N 74 E
7	1210287	1148929	997	75	30	2,5	196	N 55 E
8	1214321	1148196	1059	62,5	25	2,5	206	S 02 W
9	1213984	1147454	879	37,5	25	2,5	57	S 74 E
10	1210784	1148367	825	150	15	10	60	N 10 W
11	1210784	1148367	841	114	19	6	83	N 35 E

^a. Sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste.

Tabla 4. Características de la adquisición para las SEV. Tomado de UNAL-Corantioquia (2004).

ID_SEV	SEV_N°	Norte (m)	Oeste ^a (m)	Altura (msnm)	Longitud (m)	Rumbo
26	79	1144091,5	1214434,41	455	200	N 60° E
28	34	1143169,63	1214236,26	485	240	N 80° W
33	46	1143833,54	1213633,27	485	110	--
35	95	1143223,34	1213294,74	485	300	N 30° W
38	47	1144479,86	1212552,58	539	180	N 50° E
39	44	1142976,63	1212483,24	493	140	N 50° W
42	39	1146301,40	1212008,75	640	160	N 50° E
44	40	1143966,72	1211415,27	522	133	N 70° E
45	83	1147338,56	1211338,85	710	200	N 30° W
47	41	1146497,48	1211072,22	659	140	N 55° W
51	42	1143596,15	1210632,48	510	100	N 80° W
54	43	1142791,35	1210280,23	480	380	--

^a. Sistema de coordenadas Magna Bogotá.

5.2 Procesamiento de los SEV y las TER

La propiedad física que caracterizó los SEV en el municipio de Sopetrán, realizados por la

Universidad Nacional en 2004, fue la resistividad eléctrica aparente (datos tomados en campo) y la distancia de AB/2 (espaciado entre los electrodos de corriente) que son los datos crudos representados en la curva negra (ver Figura 8). Estas resistividades aparentes se ingresaron al software IPI2WIN para determinar la resistividad teórica (representada en la curva roja de la Figura 8), empleando curvas patrón ya predeterminados en el software. La curva de resistividad verdadera (de color azul en la Figura 8), es calculada por el programa buscando el mejor ajuste entre las dos curvas anteriormente descritas y la implementación de algoritmos de inversión ya estipulados en el software. En el Anexo 4 (digital, datos crudos SEV, Tomados de UNAL-Corantioquia 2004) se incluyen todos los datos crudos de los SEV.

Para la interpretación de los SEV se tiene en cuenta la similitud entre las curvas de resistividad aparente (curva negra) y la curva de la resistividad teórica (curva roja), representada por el error cuadrático medio (RMS). Adicionalmente, se agregan o disminuyen capas geoelectricas según el comportamiento de las gráficas, dependiendo de su concavidad y convexidad. Este ajuste se realiza hasta tener un perfil en 1d acorde a las observaciones de campo como el levantamiento de afloramientos (tipo de roca, granulometría, matriz, tipo de depositación para los depósitos) y las resistividades aparentes (Figura 9).

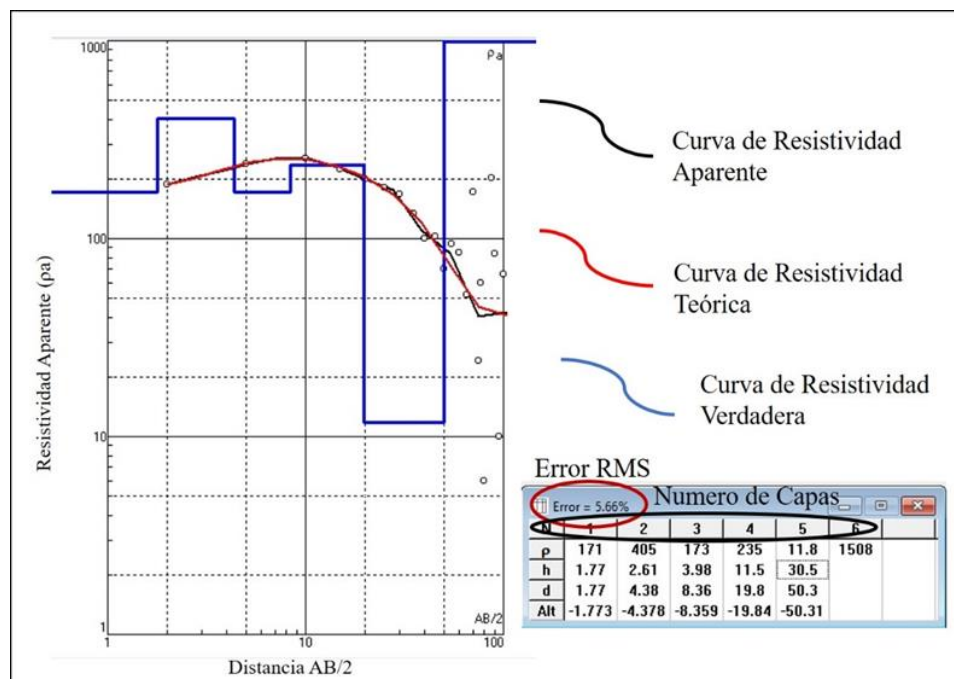


Figura 8. Curva de resistividad aparente vs distancia de AB/2 del SEV 26. Elaboración propia.

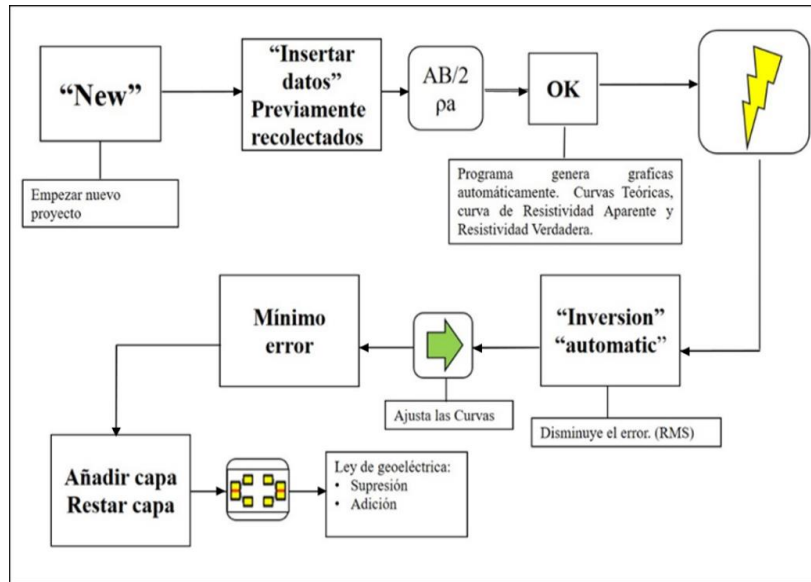


Figura 9. Flujograma del procesamiento para los SEV. Elaboración propia.

Para el procesamiento e interpretación de las TER se utilizó el software RES2DINV enfatizando en los datos de resistividad aparentes ilustrados en una pseudosección aparente (ver Figura 10a), los modelos matemáticos y parámetros de inversión de una pseudosección teórica (ver Figura 10b), los cuales se presentan a continuación en la Figura 9 para dar como resultado la pseudosección de resistividades reales (ver Figura 10c). En el Anexo 5 se presentan los datos crudos para todas las TER.

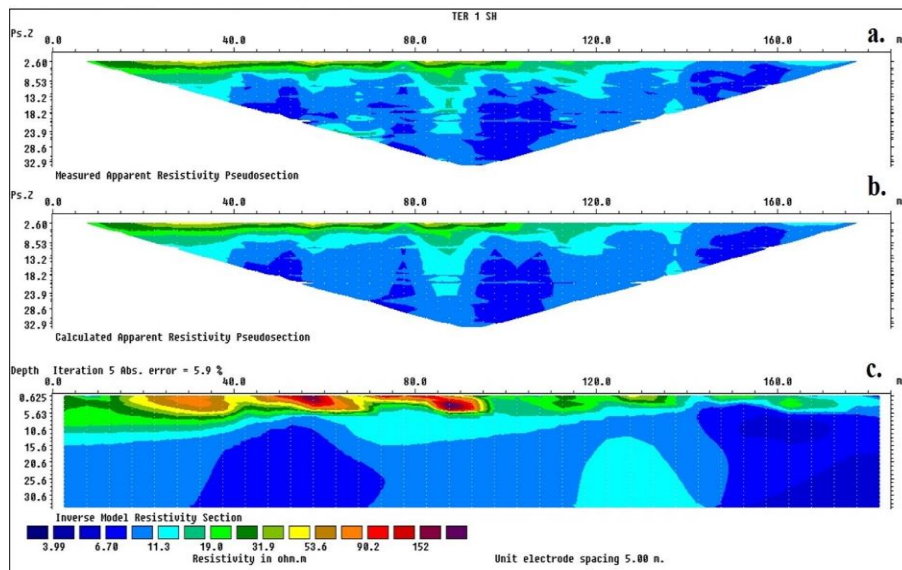


Figura 10. Tomografía eléctrica resistiva, figura a. pseudosección datos aparentes, figura b. pseudosección teórica, figura c. Pseudosección resistividad real.

Con el fin de llegar a la pseudosección de resistividades reales se procedió a utilizar las funciones para el mejoramiento de la calidad de los datos aparentes (Loke, 1999):

- *Exterminate bad data point*, permite eliminar los datos que presentan valores de resistividad claramente erróneos con los niveles de adquisición.

Los datos anómalos se pueden observar con facilidad en la opción *show Exterminate bad data point* que ofrece el software.

- *Damping factor*, función que depende de la cantidad de ruido disponible en la primera capa de los datos. Este es un parámetro tenido en cuenta por Loke (1999) en la fórmula de inversión de Gauss-Newton como λ , que permite disminuir la repercusión de datos de mala calidad en el modelo final de inversión. Los límites de amortiguación, rangos entre 0.3 para datos con un ruido considerable y valores de 0.1 para el caso contrario, estos están establecidos por defecto del software.

- *Vertical to horizontal flatness filter ratio* o filtro de planicie vertical y horizontal. Este filtro establece un radio entre la amortiguación vertical y horizontal con el fin de priorizar alguna de estas dos teniendo en cuenta la disposición de la anomalías.

- *Diagonal filter* o filtro de rugosidad diagonal utilizado en componentes tanto de x como de z.

- *Forward modeling settings*, realiza la comparación entre los datos de campo y los modelos teóricos empleando en el procesamiento del modelo de mallado finito con 4 nodos. Tal como lo establece el software por defecto, si los datos presentan corrección topográfica se selecciona la función de *finite-element* y para el caso opuesto *finite diferente* (ver Figura 11).

En los parámetros y modelamientos matemáticos de la inversión (ver Figura 11) se ajustó lo siguiente:

- *Convergence limit*: representando en valores entre el 1% y 5%. Los cuales son los valores que el software recomienda por defecto.

- El número de *Iterations*: se utilizaron hasta 7 iteraciones, con el fin de tener un rango amplio,

sin embargo generalmente el modelo de inversión converge en 4 iteraciones.

- *Robust inversion model*: seleccionando un modelo robusto originando un contraste de resistividad alta para tener mayor realce en la resistividad en el modelo de inversión.
- *Choose logarithm of apparent resistivity*: se recomienda emplear el logaritmo de los valores de resistividad aparente para tener una normalización en los datos.
- *Modify smoothnes – constrained least squares method*: permitiendo aplicar la restricción de la suavidad en el modelo.
- *Type of method to solve least square equation*: se sugiere utilizar un modelo estándar realizando una solución exacta disponiendo de una cantidad de datos menor a 3000 mediciones.
- *Model discretization*: distribución del modelo de bloques de los datos. En este parámetro se puede ajustar el grosor de los bloques en la función *Change thickness of layer*. Con esta función se buscó tener un modelo de bloques homogéneo y acorde a la cantidad de datos adquiridos.
- Finalmente, en la pseudosección de resistividad reales se puede emplear la disposición de los datos como guía aproximada para discretizar el subsuelo en bloques rectangulares empleando la función *Extend model* (Loke, 1999).

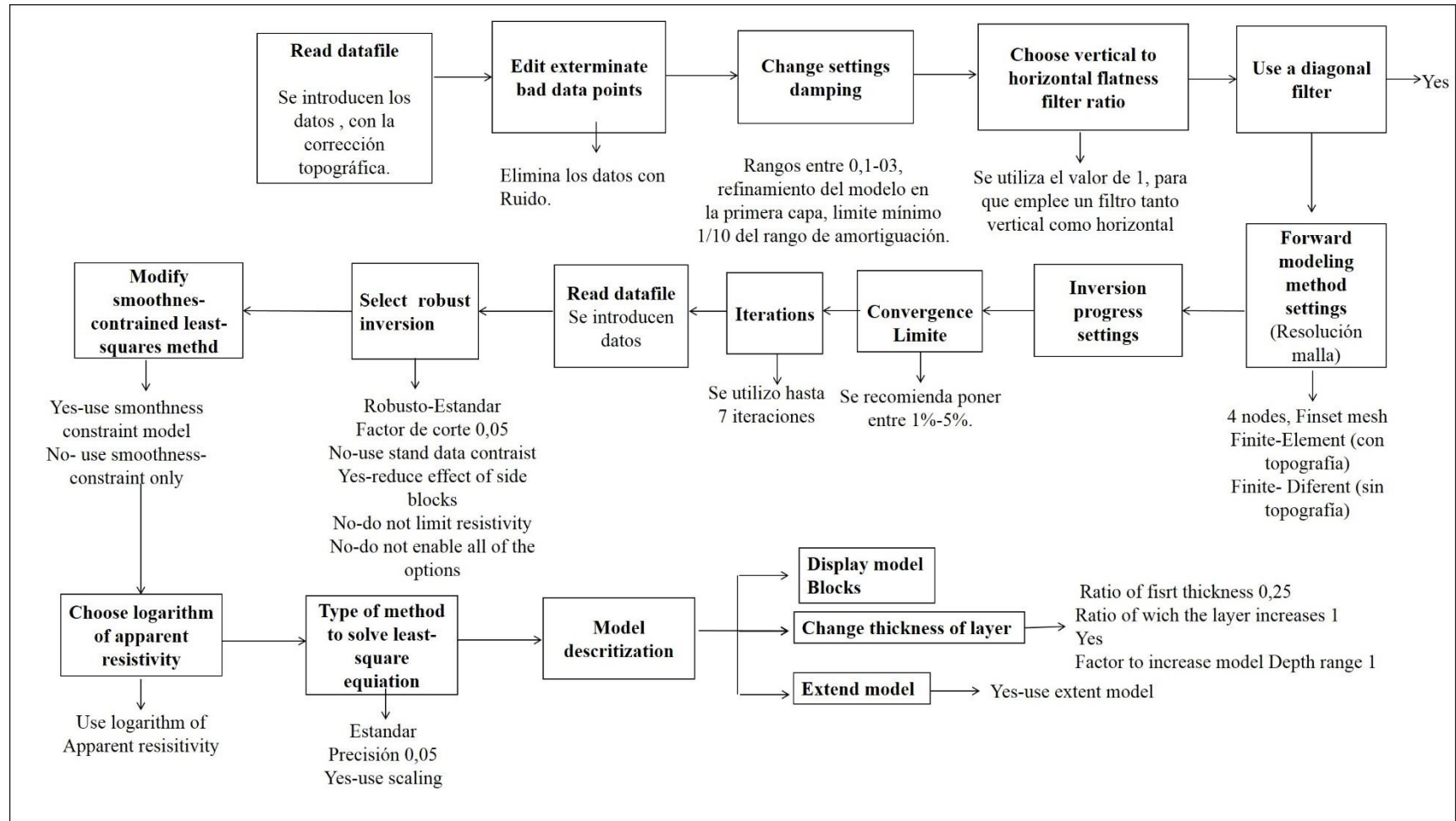


Figura 11. Flujograma del procesamiento de las TER en el software RES2DINV. Elaboración propia.

6. Resultados y análisis

A continuación, en la Tabla 5 y Figura 12 se presenta la interpretación de los datos geoelectrónicos (12 SEV) adquiridos por UNAL-Corantioquia en 2004, 2 TER adquiridas en el curso Campo II del pregrado geología de la Universidad EAFIT en 2017 y datos propios para el presente trabajo (9 TER).

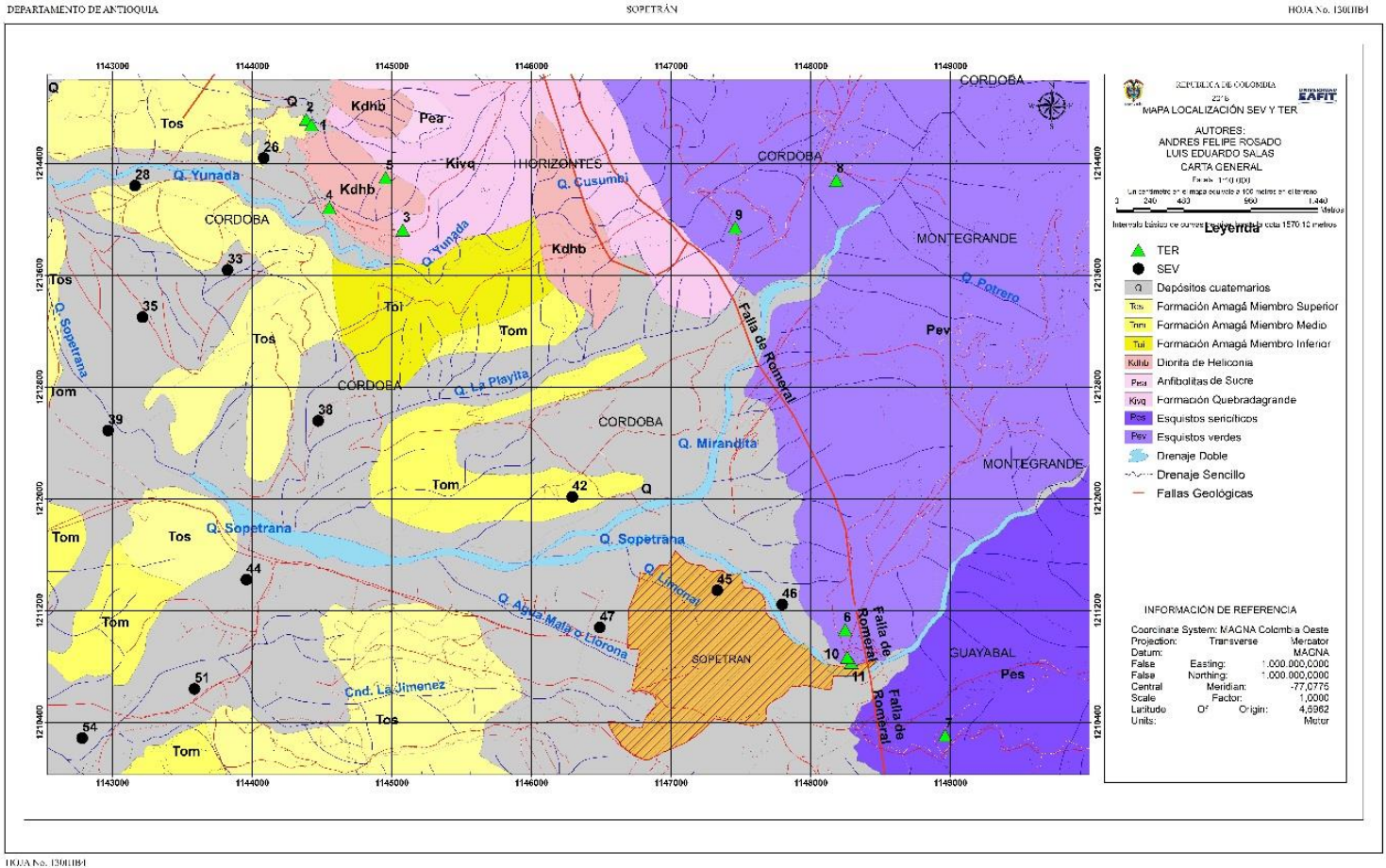


Figura 12. Localización de TER y SEV (tomados de UNAL-Corantioquia 2004).

Tabla 5. Distribución de los SEV y las TER

FORMACIÓN	SEV ^a	TER ^b
Formación Amagá	4	2
Diorita de Heliconia	1	1
Esquistos	3	4
Formación Quebradagrande	0	1
Depósitos Cuaternarios	4	1
TOTAL	12	11

^a Los SEV fueron adquiridos por UNAL-Corantioquia en

A continuación, se hace una descripción y análisis de resultados según la formación geológica donde se realizaron los ensayos geofísicos.

6.1 Depósitos Cuaternarios

En la zona de estudio los depósitos cuaternarios corresponden a depósitos aluviales, los cuales representan sitios de fácil acceso para la aplicación de los SEV. Geomorfológicamente, se ubican en los valles de algunas quebradas o ríos, representados por terrazas.

En los perfiles de meteorización, el flujo es principalmente de carácter intergranular, ya que no están lo suficientemente afectados por la actividad tectónica como para tener una densidad importante de discontinuidades. Por ende, el perfil de meteorización no presenta mucho espesor de suelo (máximo 2m) y el material se encuentra en un grado de meteorización bajo.

Los SEV que corresponden a esta unidad son el 45, 47, 51 y 54 (ver Figura 12) y su análisis detallado se presenta en el Anexo 6 (digital, reinterpretación de los SEV en el software IPI2WIN). Las curvas obedecen a secuencias de sedimentos que varían en compactación y granulometría.

En términos generales, se encontró que los limos presentan resistividades entre 17-70 ohm-m, las arcillas entre 2-13 ohm-m, pero en ocasiones se encuentra el material fino mezclado, o material limoarcilloso con resistividades de 32-70 ohm-m. Los horizontes que contienen gravas, poseen resistividades incluso mayores a 1000 ohm-m (ver Figura 13).

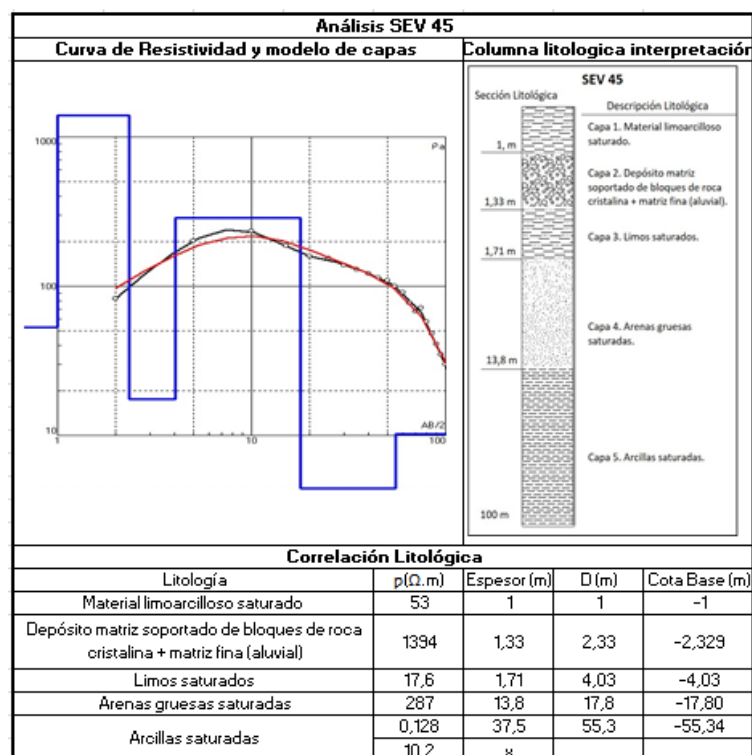


Figura 13. Interpretación SEV 45, se observa las diferencias entre capas según compactación, saturación y granulometría. Elaboración propia. Datos de resistividad aparentes tomados de UNAL-Corantioquia (2004).

La TER 10 (ver Figura 12) corresponde a esta unidad de depósitos (para mayores detalles referirse al Anexo 7 - interpretación de las TER). En ésta, se puede corroborar que los materiales finos presentan resistividades entre 13-80 ohm-m (zona D) (ver Figura 14). Las arenas saturadas se encuentran entre 80-140 ohm-m (zona B y C). Adicionalmente, se observa un depósito de gravas secas producto de la depositación caótica de la Quebrada la Sopetrana, debido a las observaciones de campo y rangos de resistividades que van en aumento (≈ 440 ohm-m) a una profundidad de 5m (ver zona A Figura 14). Estas resistividades están asociadas a un macizo rocoso que ha sufrido procesos de meteorización, debido la notable disminución en el promedio de resistividades esperadas (>1000 ohm-m), que se ven afectadas por propiedades de la roca como porosidad secundaria, permeabilidad, compactación, entre otros.

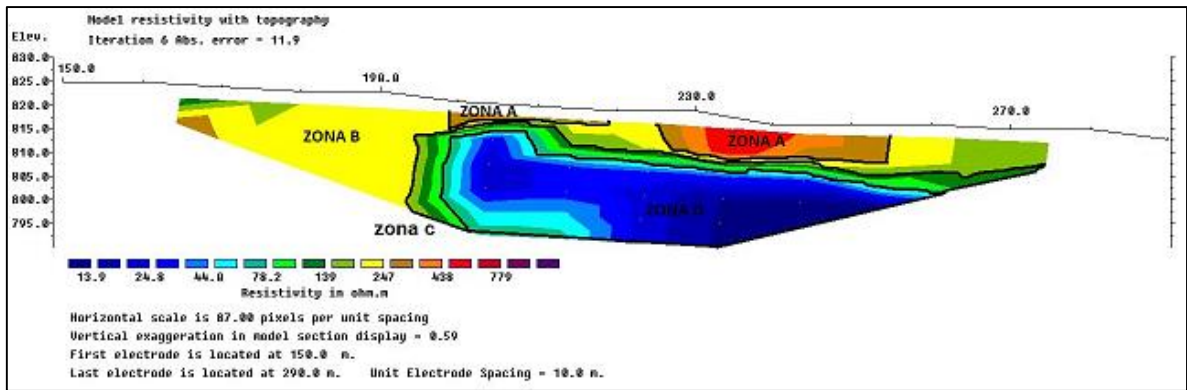


Figura 14. Pseudosección TER 10. Depósito cuaternario. Cada zona se encuentra descrita en Anexo 7.

Los perfiles generados a partir de depósitos cuaternarios se caracterizan por no estar muy afectados por meteorización química, pero las características hidráulicas permiten que el flujo intergranular sea un mecanismo eficiente para el movimiento de agua en el subsuelo, facilitando así la recarga directa por precipitación. Adicionalmente, su carácter de zonas planas permite la acumulación de agua subterránea, constituyendo así los principales acuíferos de interés en la zona de estudio.

6.2 Formación Amagá

Esta unidad de edad terciaria se observó en campo aflorando en colinas de poca altura, representadas en la mayoría de las ocasiones por areniscas de grano medio color beige, de buena selección y cementación (ver Figura 15) y lentes de lodolita gris.



Figura 15. Colinas representadas por la Formación Amagá y coloración del producto de meteorización de esta. Fuente Propia.

El perfil de meteorización de esta formación se caracteriza por dejar residuos silicatados, muy resistentes a la meteorización química, por ende, se forma un horizonte de suelo nivel V según Dearman (1995), de espesores de 8 m. Además, las capas de roca de esta formación poseen un alto nivel de litificación, lo que puede dificultar el movimiento de fluidos.

Los SEV que corresponden a esta unidad son el 28, 33, 39 y 42(ver Figura 12) y se encuentran interpretados a detalle en el Anexo 6. Se observan en estos SEV secuencias típicas de esta formación, como areniscas intercaladas con horizontes de gravas y materiales arcillo-limosos. Para los materiales arenosos, las resistividades son de 131-224 ohm-m, los materiales arcillo-limosos van de 2-100 ohm-m y las gravas están en un rango de 424-642 ohm-m (Figura 16) según varía el contenido de humedad, porosidad y compactación.

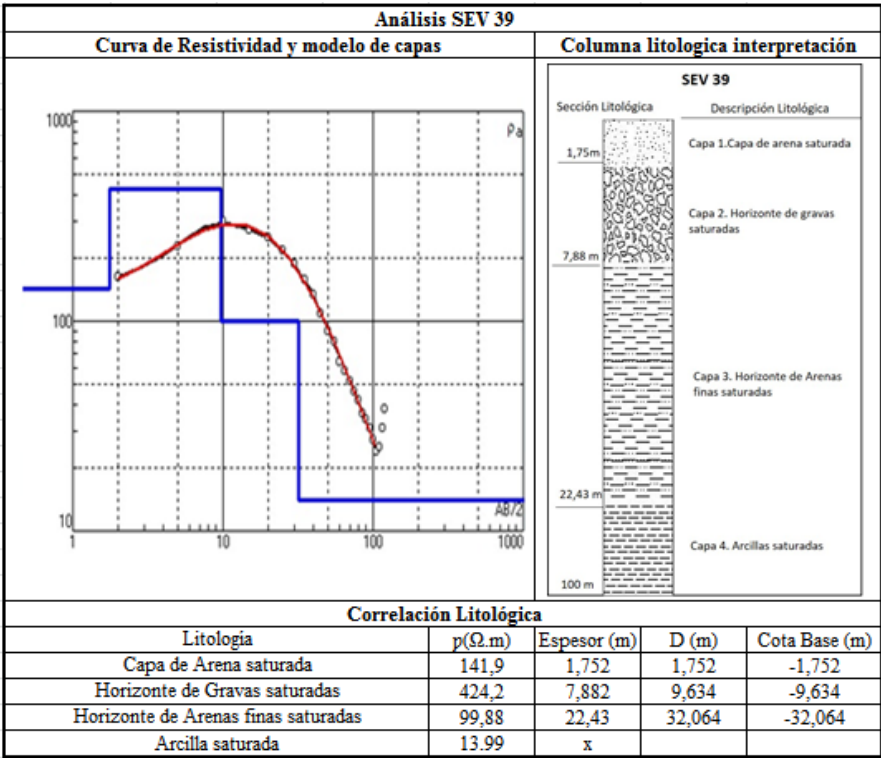


Figura 16. Interpretación SEV 39, secuencia típica de la formación Amagá. Elaboración propia. Datos de resistividad aparente tomados de UNAL-Corantioquia (2004).

Sobre la Formación Amagá se adquirieron las TER 1 y 2 (ver Figura 12) que se encuentran descritas en el Anexo 7. En éstas, se observa un medio muy homogéneo geoelectricamente, con variaciones en el contenido de saturación, lo que induce a la caída de los valores de resistividad. En los primeros metros del perfil se tienen los valores más altos de resistividad, que corresponden a arenas finas a gruesas con contenido medio de

humedad (ver zona A Figura 17), seguido en profundidad de un medio limo-arcilloso saturado (zona B). Las resistividades para las arenas van de 30-143 ohm-m y para el material fino 3,98-18,5 ohm-m.

La meteorización química es un factor que tiene poco desarrollo en esta formación, debido a que la litología es mayormente cuarzosa y este es un mineral resistente a la meteorización.

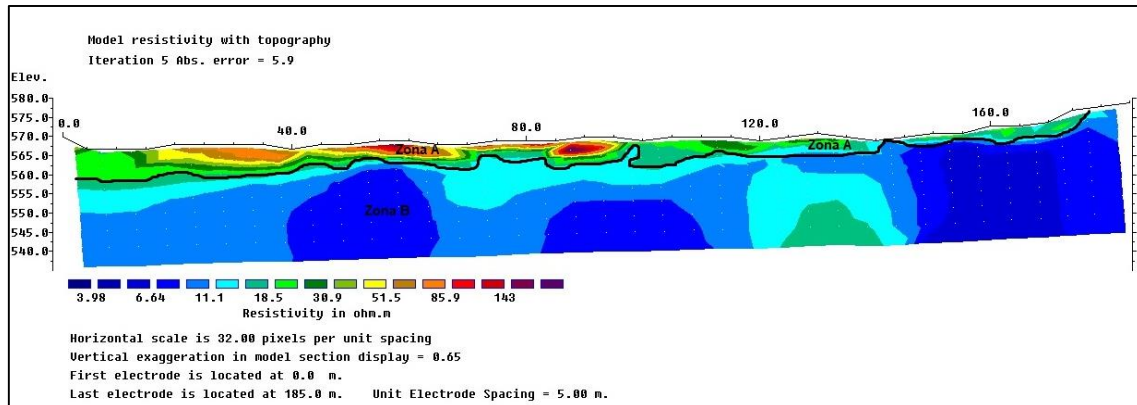


Figura 17. Pseudosección TER 10. Perfil sobre la formación Amagá. Cada zona se encuentra descrita en el Anexo 7.

6.3 Diorita de Heliconia

Esta unidad cretácica se observó en las campañas de campo intruyendo la Formación Quebradagrande. Es una roca de composición intermedia, la cual en ocasiones grada a pulsos de composición máfica (gabro), el cual presenta serpentinización a través de los planos de debilidad. En los afloramientos de la zona de estudio se puede ver que el macizo rocoso está afectado por intensos procesos de meteorización (ver Figura 18).

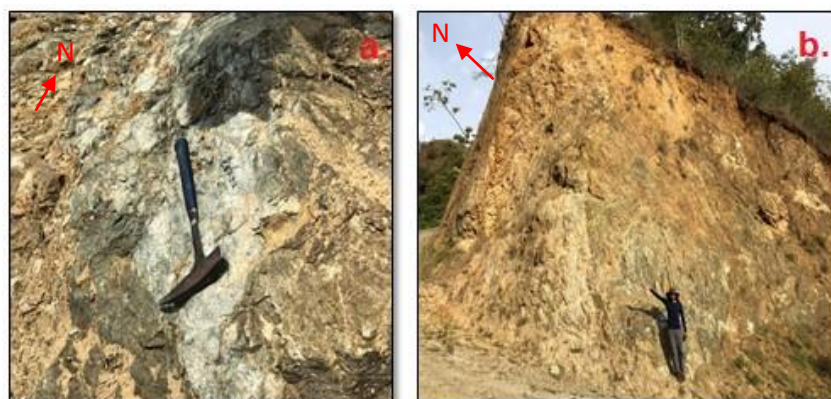


Figura 18. a. Gabro afectado por procesos de serpentinización. b. Afloramiento de la Diorita de heliconia afectada por tectónica y gradando a gabro. Fuente propia.

Esta formación no posee desarrollo de potentes horizontes de suelo residual; sin embargo, se observó el desarrollo de suelo nivel V según Dearman (1995), en el que la roca se encuentra muy debilitada, hasta el punto de triturarse con la presión ejercida con la mano. La roca en este estado se encuentra en clastos de roca muy angulosos mezclados con material arenoso seco color beige (10YR(8/3) según MUNSSEL,1994) (ver Figura 19). Infrayaciendo este material, se encuentra la diorita en un estado menos meteorizado como se verá más adelante en las tomografías.

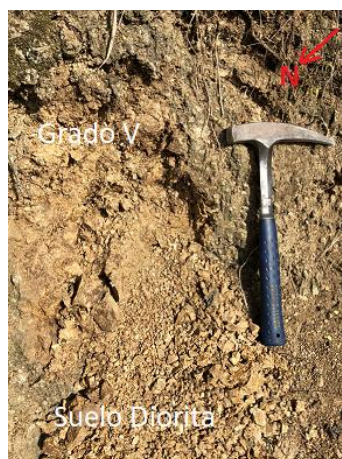


Figura 19. Suelo residual de la diorita de heliconia correspondiente a un suelo grado V según Dearman (1995). Fuente propia.

El SEV 26 (ver Figura 12) se realizó sobre esta unidad (Anexo 6). Este muestra una secuencia estándar de un depósito cuaternario, donde se intercalan materiales arenosos con gravas y limos. Los datos de resistividad aparente al final de la curva tienden a dispersarse a aproximadamente 41m de profundidad. Este comportamiento es típico cuando hay una transición entre una roca menos consolidada o sedimentaria y roca cristalina en un contacto irregular; lo que induce a plantear la presencia de un cuerpo cristalino con resistividad de 5761 ohm-m, que actúa como basamento para esta zona del área de estudio. Por correlación con geología superficial este se asocia con la Diorita de Heliconia (ver Figura 20).

A esta formación está asociada la TER 4 (ver Figura 12), que se encuentra descrita en el Anexo 7. En ésta se encuentra plasmado lo que se describió antes en la sección 'Perfil de Meteorización'. En la parte superficial, se encuentran llenos antrópicos con resistividades entre 9,29-32,6 ohm-m (ver zona A Figura 21). La roca se encuentra muy debilitada y mezclada con un material arenoso producto de la meteorización (zona B) con resistividades entre 115-404 ohm-m. Las resistividades varían dependiendo el horizonte

del perfil, entre 115 y 757 ohm-m, con los valores más altos correspondientes a horizontes de roca menos meteorizados y, resistividades que varían entre 404-757 ohm-m (zona C).

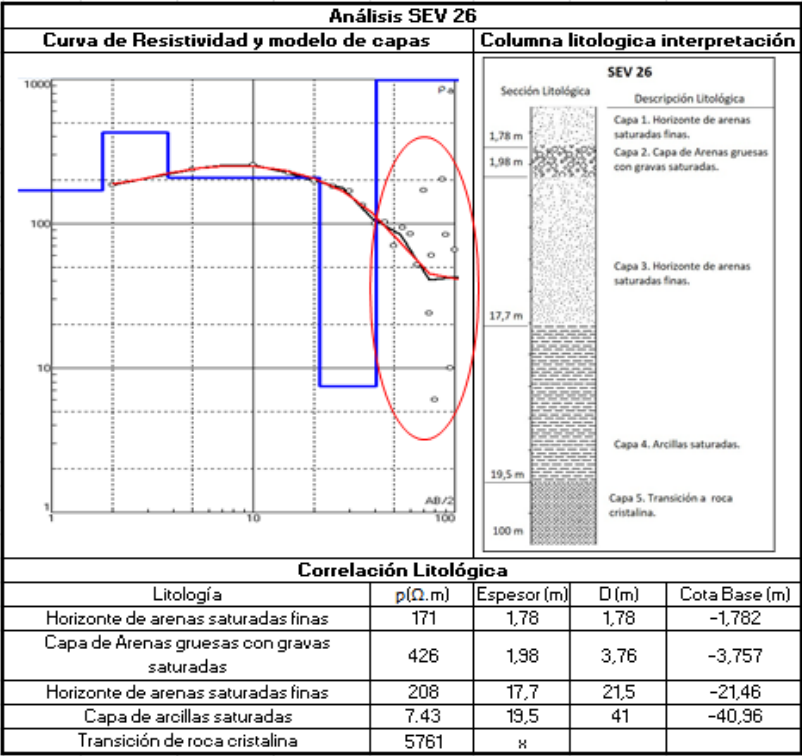


Figura 20. Interpretación SEV 26. Secuencia asociada a la Diorita de Heliconia. Elaboración propia. Datos de resistividad aparente tomados de UNAL-Corantioquia (2004).

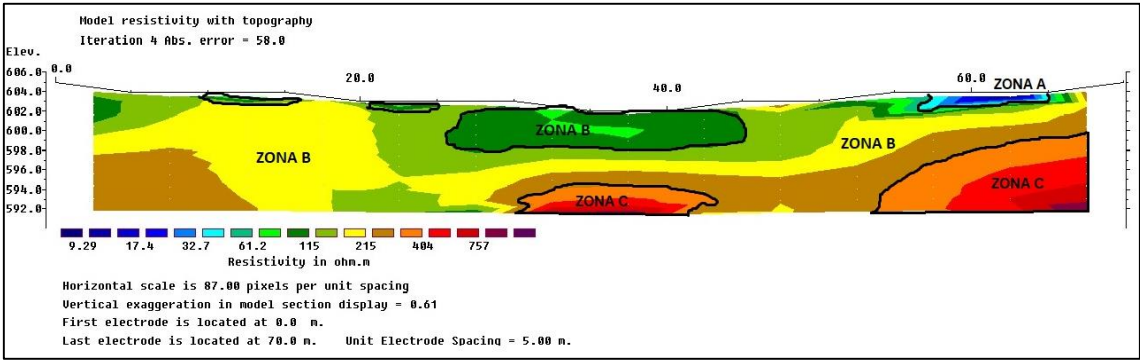


Figura 21. Pseudosección TER 4. Perfil sobre la Diorita de Heliconia. Cada zona se encuentra descrita en el Anexo 7.

6.4 Formación Quebradagrande

Compuesta por intercalaciones de materiales volcánicos (aglomerados, basaltos) dispuestos casi verticalmente (ver Figura 22). Aflora en la unidad geomorfológica definida como Sgr (ganchos de deflexión), por lo que está afectada estructuralmente. El plano de intercalación está dispuesto 353/65E.

Como se observa en la Figura 22, esta formación se caracteriza por no poseer un amplio desarrollo de saprolito. Sin embargo, el suelo se caracteriza por ser arenoso, de coloraciones naranjas-rojizas y beige. Infrayaciendo está delgada capa, se encuentra la intercalación típica de la formación en estratos casi verticales. En este horizonte, la roca conserva totalmente su estructura, sin embargo, se encuentra muy afectada por esfuerzos tectónicos, lo cual se evidencia en estratos de roca menos potente compuestos por material piroclástico que se pueden triturar con la mano.



Figura 22. Intercalación de materiales volcánicos, formación Quebradagrande. Fuente propia.

Sobre esta formación no se realizó SEV en la campaña de adquisición de UNAL-Corantioquia (2004).

Las TER 3, 5 y 9 (ver Figura 12) (descritas a detalle en el Anexo 7) se realizaron sobre esta formación. Se observa un perfil de meteorización en el que la roca tiende a mostrar su estado original hacia horizontes más profundos. El comportamiento de las resistividades es afectado por el fracturamiento, meteorización y compactación de los materiales, con valores de 130-204 $\Omega.m$ (ver zona B Figura 23). Aquí, la roca tiene residuos de material arenoso debido a la trituración. La roca menos meteorizada se encuentra hacia los horizontes más profundos, con resistividades entre 318-773 $\Omega.m$ (zona D); en efecto, la roca muestra los vestigios de la actividad estructural local y meteorización, debido a los bajos valores de resistividad.

Estos valores están catalogados como bajos, puesto que no superan las resistividades esperadas para un macizo rocoso cristalino (1500-5000 ohm-m) (UNAL, 2000). Las resistividades altas se asocian al contenido de minerales aislantes y baja porosidad del

macizo rocoso (Loke, 1999).

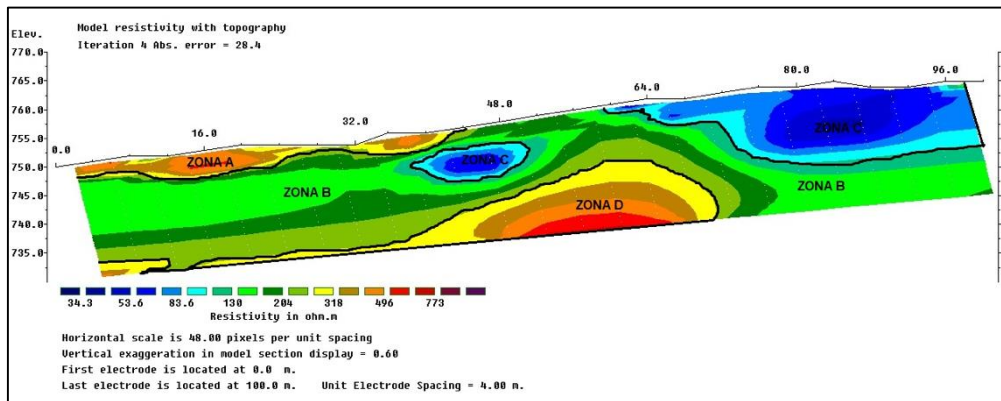


Figura 23. Pseudosección TER 3. Perfil sobre la formación Quebradagrande. Cada zona se encuentra descrita en el Anexo 7.

6.5 Esquisto sericítico y grafitoso (Grupo Ayurá Montebello)

Esta unidad pertenece al basamento de la Cordillera Central y está formada por esquistos micáceos (sericita, acinolita y clorita) y grafitosos, que en ocasiones presentan piritita y boudines de cuarzo, y que están afectados por una intensa actividad estructural. La expresión de esto se evidencia en plegamientos y diaclasas en los afloramientos observados en las campañas de campo (ver Figura 24) y, que se describen con detalle en el Anexo 1 En algunas ocasiones, incluso, se observa cloritización a través de las diaclasas.

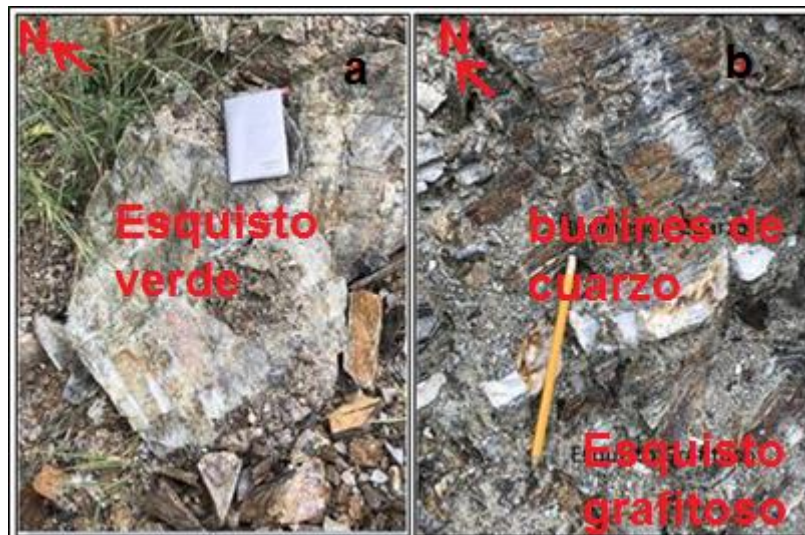


Figura 24. Figura a. Bloques de esquisto verde compuesto por sericita y actinolita. Figura b. Bloques de esquisto grafitosos con budines de cuarzo. Fuente propia.

Por lo general, en los afloramientos de esta formación no se tiene un gran desarrollo

de saprolito en la parte superior. En la superficie, el perfil se compone de una capa orgánica muy delgada (< 1 m) en la que se encuentran las raíces de las plantas. A esta capa la sigue en profundidad un delgado horizonte (± 4 m) con un grado de meteorización entre III y VI según Dearman (1995), que se caracteriza por dejar un residuo limoarcilloso color beige (8/6 10YR según Munsell) con variaciones a tonalidades más rojizas mezclado con la roca; este horizonte es el señalado como 'suelo' en la Figura 25.

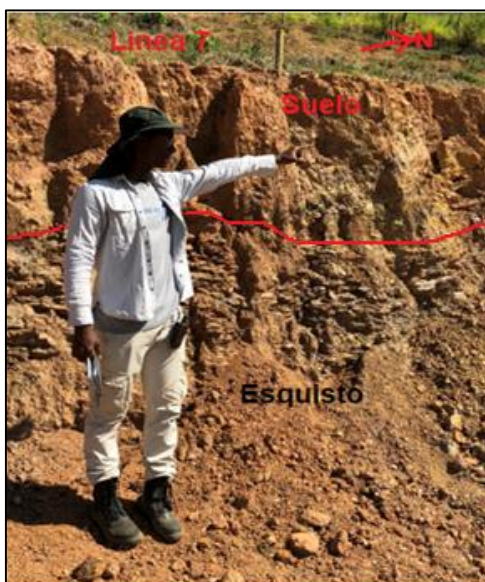


Figura 25. Esquistó altamente meteorizado. Fuente propia.

El horizonte llamado 'Esquistó' en la misma figura, corresponde a un nivel de meteorización más moderado (grado de meteorización entre I y II según Dearman, 1995), en el cual la roca se reconoce en su estructura; sin embargo, se encuentra debilitada por procesos de meteorización.

Pertenecen a esta formación los SEV 35 y 44 (ver Figura 12) , descritos en detalle en el Anexo 6. Estos, muestran una secuencia de rocas con diferentes grados de compactación, pero compuesta de horizontes sedimentarios, en los que los materiales varían en granulometría con horizontes desde arcillas hasta gravas. En la base de estas secuencias se observa un comportamiento de dispersión en los datos de resistividad aparente, asociados a la transición hacia el basamento cristalino (Grupo Ayurá Montebello), donde se observa la resistividad de la última capa notablemente alta, entre 1361-3207 ohm-m (ver Figura 26).

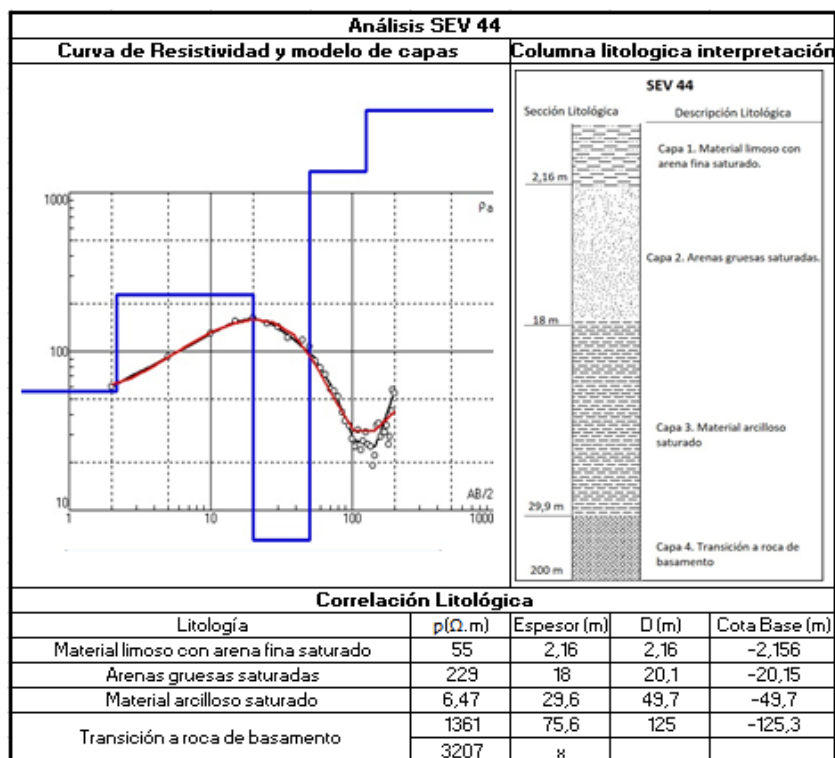


Figura 26. Interpretación SEV 44. Secuencia de sedimentos seguida del basamento cristalino.
Elaboración propia. Datos resistividad aparente tomados de UNAL-Corantioquia (2004).

A esta unidad pertenecen también las TER 6, 7, 8 y 11 (ver Figura 12), las cuales se encuentran descritas en detalle en el Anexo 7. En éstas, se observa que en los primeros metros del perfil (≈ 2 m) se presenta desarrollo de saprolito grado 3 según Dearman (1995) y la resistividad varía entre 1031-2160 ohm-m (ver zona A Figura 27), caracterizado por bloques de roca en una matriz arcillo-limosa. Este horizontes es seguido en profundidad por un estado menos meteorizado de la roca donde se reconoce su estructura; sin embargo, este horizonte está intensamente fracturado y debilitado (zona B), con resistividades de 3126-6648 ohm-m. Las altas resistividades se deben a la naturaleza aislante de los principales minerales formadores de roca. Por ultimo en la zona C, se observa el esquistos altamente meteorizado y con un gran porcentaje de saturación. Esta saturación se interpreta por la notable disminución en resistividad (492-1031 $\Omega.m$), y capacidad POTENCIAL de transmisión hidráulica observada en afloramientos de control.

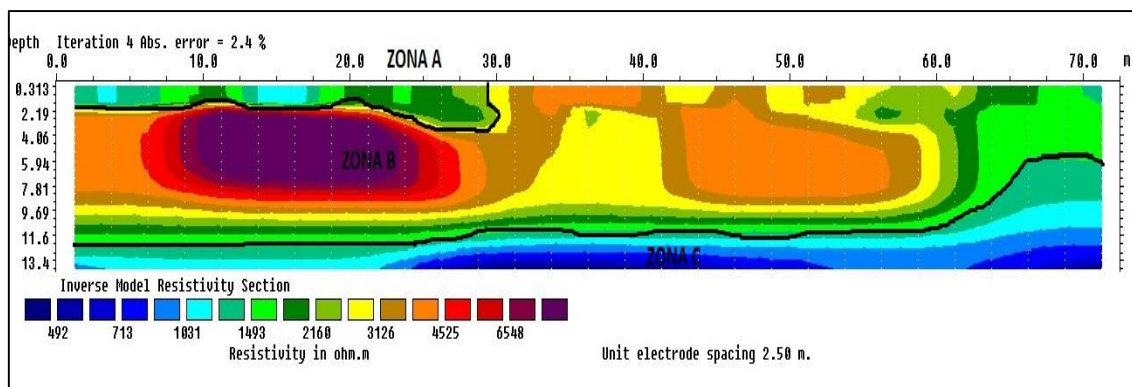


Figura 27. Pseudosección TER 7. Perfil de meteorización Grupo Ayurá Montebello. Cada zona se encuentra descrita en el Anexo 7.

El contenido de humedad reduce los valores de resistividad, como se ve en los últimos horizontes de las TER 6, 7 y 8 (55-959 ohm-m), lo que indica una buena conductividad hidráulica en el macizo rocoso, puesto que la línea se encuentra cerca al cauce de la quebrada La Sopetrana.

Finalmente, en la Tabla 6 se presenta el rango de resistividades resultantes para cada formación de interés. Esto se obtuvo de los SEV adquiridos por la UNAL-Corantioquia, 2004, los datos TER adquiridos en el curso Campo II del pregrado geología de la Universidad EAFIT en 2017 y los datos TER adquiridos para el presente trabajo.

Tabla 6.Tabla de resistividad absolutas para las unidades litológicas. Fuente propia.

Tipo de Material		Resistividad (ohm-m)
Rocas Sedimentarias	Material Limoarcilloso	3 - 18,5
	Formación Amagá Areniscas	30 - 143
	Conglomerados-Areniscas	424 - 642
	conglomeráticas	
Rocas Ígneas	Diorita de Heliconia meteorizada	115 - 757
	Diorita de Heliconia fresca	5761
	Formación Quebradagrande meteorizada	318 - 773
Rocas Metamórficas	Esquistos Sericítico y Grafitoso fresco	3126 - 6648
	Esquistos Sericítico y Grafitoso meteorizado	1031 - 2160
	Esquistos Sericítico y Grafitoso saturado y meteorizado	55-959
Depósitos Cuaternarios	Intercalaciones de arena fina, limos y arcilla	13-80
	Arenas	80-140
	Gravas con contenido variable de saturación	329-642
	Depósitos torrenciales y gravas	1000-1394

7. Discusión

Se quiere entender por qué se reportan valores de resistividad bajos en las litologías cristalinas, las cuales se señalan como sitios de bajo potencial hidrogeológico en (UNAL-Corantioquia, 2004), y qué representan estas zonas para la dinámica del acuífero de Santa Fe de Antioquia,

La meteorización, tanto física como química juegan un papel importante en las permeabilidades de las rocas cristalinas constituyéndolas como zonas de recarga y tránsito del acuífero de Santa Fe de Antioquia. Esto se ve evidenciado en los perfiles de meteorización descritos desde la geología y la geofísica.

El contraste de permeabilidad entre las diferentes litologías obedece a la susceptibilidad de meteorizar, esto varía entre los principales minerales formadores de roca, puesto que los minerales se disuelven a distintas tasas y en diferentes concentraciones, lo que da origen a variaciones en permeabilidad (Wothington et al, 2016). Adicionalmente estas variaciones también obedecen a las edades geológicas de las rocas ya que los tiempos de exhumación varían entre las mismas y, por lo tanto, los agentes atmosféricos que aceleran la meteorización han actuado durante diferentes periodos de tiempo.

La porosidad de las rocas cristalinas que se encuentran en las zonas potenciales de recarga y tránsito del acuífero de Santa Fe de Antioquia, son órdenes de magnitud menor que las rocas sedimentarias (Wothington et al, 2016). Sin embargo, el movimiento de fluidos en estos macizos rocosos se puede dar a través de las fracturas donde suceden importantes procesos de meteorización.

El flujo a través de las fracturas podría genera frentes de meteorización que se van expandiendo hasta moldear redes de fracturas interconectadas, lo cual es una posibilidad que merece ser modelada (ver Figura 28). Si la meteorización es incongruente, es decir, deja residuos físicos cuando sucede el fenómeno, adicionalmente se forma un saprolito en la parte superficial del perfil (ver tipo b y d Figura 2) (Wothington et al, 2016).

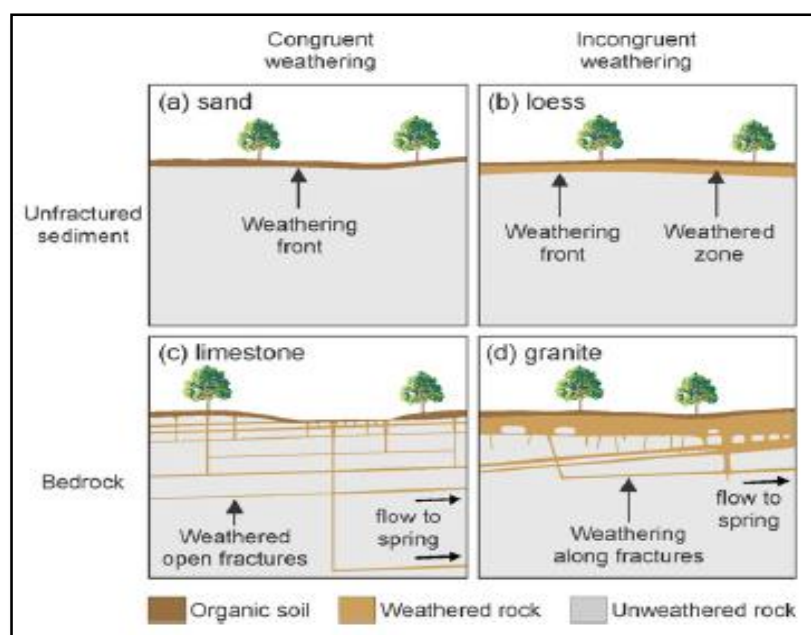


Figura 28. Modelos de perfiles de meteorización en diferentes condiciones. Tomado de Worthington et al. (2016).

Para el presente estudio el perfil tipo c y d son los modelos idealizados que mejor podrían describir la realidad del área de estudio, debido a que los macizos rocosos evidencian procesos de meteorización que pueden estar actuando a través de las fracturas observadas en campo y comportamientos en las resistividades.

Las rocas cristalinas que hacen parte de estas zonas de recarga y tránsito están reportadas con valores de resistividad inusuales en (UNAL-Corantioquia, 2004) como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Resistividades de las rocas sedimentarias, metamórficas y depósitos cuaternarios. Tomado de UNAL-Corantioquia (2004).

Tipo de Material		Resistividad ^a (ohm-m)	Resistividad ^b (ohm-m)
Rocas Sedimentarias	Areniscas medias	20-50	30-143
	Formación Amagá Areniscas conglomeráticas y conglomerados	60-120	424-642
Rocas Metamórficas	Anfibolita fresca	100-130	N/D
	Anfibolita meteorizada	30-80	N/D
	Esquistos meteorizados	20-30	1331-2160
Depósitos cuaternarios	Intercalaciones de arenas finas, limos y arcillas	10-15	13-80

Arenas con menor contenido de grava	50-200	80-140
Arenas con mayor contenido de grava	150-1000	1000-1394

^a. Datos adquiridos e interpretados por UNAL (2004).

^b. Datos adquiridos e interpretados, fuente propia.

^{N/D} Unidad geológica que no se realizó TER por presentar bloques caídos.

En dicho estudio se concluye que las rocas cristalinas no se distinguen de las sedimentarias en términos de geoelectrica, reportando valores de 30-80 $\Omega.m$ para la anfibolita de Sucre meteorizada, 100-130 $\Omega.m$ para la anfibolita fresca y 20- 30 $\Omega.m$ para los esquistos meteorizados, siendo resistividades muy bajas para esta litología. Sin embargo, esto no se ve reflejado en las interpretaciones de los SEV y las TER llevada a cabo durante la elaboración de este trabajo de grado (ver columna b Tabla 7).

Durante la interpretación de las líneas de los SEV que superan los 100 m aproximadamente en profundidad de investigación, se logra identificar el basamento, evidenciado en el comportamiento de las resistividades, ilustradas en dispersión de los datos en el tramo final de la curva de resistividad aparente. Lo anterior, se debe al contacto entre la cobertura de sedimentos y el basamento que no es tajante, y muchas veces tampoco es horizontal, lo que induce a lecturas aleatorias, pero que muestran el valor típico de litología cristalina en la inversión ($> 1000 \Omega.m$). Esta dispersión en los datos de resistividad aparenten también pueden ser debido a la anisotropía del medio rocoso, pero se distingue el contraste de resistividad con la secuencia sedimentarias características de estos depósitos (valores menores a los 500 $\Omega.m$). Sin embargo, también se observan lecturas que corresponden a litología cristalina por debajo de los 1000 $\Omega.m$; esto obedece a otros parámetros que afectan la resistividad de una roca como nivel de fracturamiento, meteorización química y saturación.

Los valores de resistividad conocidos para rocas cristalinas en la zona de estudio no son lo que normalmente se espera de este tipo de rocas, ya que, generalmente, las rocas ígneas y metamórficas tienen altos valores de resistividad ($>1000 \text{ ohm-m}$) (UNAL, 2000), debido a que la porosidad es menor y los minerales formadores de rocas son en su mayoría aislantes (Loke, 1999).

Con base en los resultados se explica que estos valores están asociados a cambios en

la permeabilidad producto de la meteorización, evidenciado en los perfiles de meteorización y las TER, observando una clara diferencia entre los rangos de resistividad de las rocas cristalinas y sedimentarias o depósitos, debido a que las rocas cristalinas poseen menos intersticios y son más compactas (Loke, 1999). Sin embargo, la meteorización afecta los comportamientos en la resistividad lo cual causa que los valores de la resistividad disminuyan en relación a lo esperado.

En el Grupo Ayura Montebello el perfil de meteorización, representa una zona potencial de recarga pues, por lo observado en campo y en las tomografías, este se asemeja al perfil tipo d (Figura 28) propuesto por Wothington et al, (2016). En este se observa el desarrollo de un saprolito en la parte superior, subyacente por un macizo rocoso con desarrollo de una red de fracturas que facilita el movimiento de fluidos.

Adicionalmente, estos macizos rocosos están afectados por intensos procesos dinámicos (fracturas, diaclasas y pliegues) debido a la acción del sistema de fallas Cauca-Romeral, indicando que el flujo a través del macizo rocoso se origina entre fracturas. El flujo de agua, procedente de la precipitación local, alcanza a infiltrarse según la magnitud de la pendiente, convirtiéndose en un flujo potencial regional (Escobar et al. 2017), mecanismo que puede estar alimentando el acuífero de Santa Fe de Antioquia, pero el alcance de este proyecto no permite confirmarlo.

8. Conclusiones

- La hipótesis se cumple parcialmente, debido a que los materiales cristalinos si presentan resistividades bajas de lo normal; pero, no se confunden con las rocas sedimentarias.
- La meteorización química, la saturación y el nivel de fracturamiento afectan las resistividades de las rocas cristalinas en la zona de estudio, marcando un contraste de resistividades en los SEV entre los depósitos o rocas sedimentarias con el basamento (rocas cristalinas). Las rocas cristalinas frescas presentan una variación de resistividades entre 3126-6648 ohm-m en comparación con las rocas cristalinas meteorizadas con variación de resistividades entre 115-2160 ohm-m,
- En las rocas cristalinas en la zona de estudio el flujo de agua se da principalmente a través de las fracturas y por la meteorización química, indicando que hay procesos que

mejoran la permeabilidad del macizo rocoso en profundidad, de modo que pueden ser considerados como zonas de recarga potencial.

- Los depósitos cuaternarios no presentan meteorización química significativa; sin embargo, la geomorfología y la falta de consolidación de los materiales favorece la retención de agua. La geomorfología está representada por lugares con pendiente baja, por lo que se retiene agua en la superficie que luego por permeabilidad en los materiales se percola en el subsuelo. Esto puede estar asociado a zonas de recarga directa y a acuíferos aluviales.
- La Formación Amagá se caracteriza por presentar un bajo grado de meteorización, debido a que la litología es cuarzosa y su cementante es silíceo. Además, el alto grado de diagénesis les atribuye a las rocas una buena litificación, por lo que se pensaría que la roca no tiene muy buenas propiedades para transmitir el agua. Por ende, esta formación no resulta tan importante desde el punto de vista de la recarga para el acuífero de Santa Fe de Antioquia, a menos que el grado de fracturamiento de la misma permita el desarrollo de permeabilidades secundarias representativas.
- La Diorita de Heliconia desarrolla en la parte superior del perfil un saprolito arenoso de espesores bajos y, a medida que se profundiza en el subsuelo, la roca se encuentra afectada a lo largo de planos de debilidad. Este tipo de perfil representa una zona potencial de recarga indirecta por flujos regionales.
- La formación Quebradagrande posee una particularidad, ya que es muy heterogénea debido a que se compone de intercalaciones de materiales volcánicos; sin embargo, el desarrollo de saprolito no es grueso. Las rocas presentan un bajo grado de meteorización y el flujo intergranular no representa un mecanismo eficiente para la transmisión de fluidos; sin embargo, los planos de debilidad representan rutas potenciales de migración de fluidos que vale la pena considerar para postular estas zonas como potenciales de recarga indirecta.
- En términos generales, los macizos rocosos en la zona de estudio están afectados por intensos procesos dinámicos (fracturados y plegados) debido a la acción del sistema de fallas Cauca-Romeral.

9. Recomendaciones

- Aplicar de la metodología propuesta en Escobar et al. (2017). En esta se realiza un análisis multivariable jerárquico, donde se le asignan pesos relativos a los factores que influyen sobre la definición de la zona recarga de un acuífero. Esto, para un mejor entendimiento de la relación de la zona estudiada y sus características con el acuífero de Santa Fe de Antioquia, así confirmar u objetar la recarga por flujos regionales desde el basamento.
- Aplicar la anisotropía en los esquistos para distinguir los planos de esquistosidad.
- Incorporar los resultados obtenidos con más datos de futuras campañas de adquisición geoelectrica y realizar un mapa estructural del basamento y actualizar los perfiles geológicos que hay disponibles para la zona.
- Aplicar la anisotropía en los esquistos para distinguir los planos de esquistosidad.
- Incorporar al equipo Lippman de la Universidad EAFIT un GPS de alta precisión que permita reducir el error de desfase al tomar la ubicación y altura de cada electrodo. Con esto se puede mejorar la corrección topográfica en los casos que se hace necesario.

10. Bibliografía

- Dearman, W. R. (1995). Description and classification of weathered rocks for engineering purposes: the background to the BS5930:1981 proposals. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, 267-276.
- Durán-Quesada, A. M.; Reboita, M. & Gimeno, L. (2012). Precipitation in tropical America and the associated sources of moisture: a short review. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (4), 612–624. Doi 10.1080/02626667.2012.673723
- Escobar, J., Betancur, T., García, E., Martínez, C., & Palacio, P. (2017). Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos. *Revista Politécnica*, 13 (24), 37–48.
- Geoscan-M Ltd. (2002) IPI2Win (MT) v. 2.0.
- [Gotta Ingeniería – Corantioquia] Gotta Ingeniería - Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. (2017). Evaluación Regional del Agua en la Jurisdicción de Corantioquia (ERA), 158 p.
- [IDEAM] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá D.C. 420 p.
- [IDEAM] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2013). Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Bogotá D.C. 47 p.
- [IDEAM] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C. 496 p.
- [INGEOMINA] Instituto Colombiano de Geología y Minería. (1984). Memoria explicativa de la geología y geoquímica de las planchas 130 (Santa fe de Antioquia) y 146 (Medellín Occidental) en escala 1:100.000. Bogotá, D. C. 496 p.398.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2002) An Introduction to geophysical exploration. *Blackwell Science*, 281, 183-196.

- Loke, D. M. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *Cangkat Minden Lorong*, 6574525(1999), 63. Doi:10.3390/su8111117.
- [SGC] Servicio Geológico Colombiano. (2015). Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C.
- [SHI] Servicios Hidrogeológicos Integrales - Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. (2015). Diagnóstico para la formulación del plan de manejo ambiental del sistema acuífero del occidente antioqueño en la territorial Hevéxicos de CORANTIOQUIA. Medellín.
- Software, G., Heights, M. (2014) with 64-bit support for Windows XP / Vista / 7 / 8 Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method and non-conventional arrays On land, aquatic, cross-borehole and time-lapse surveys Geoelectrical Imaging 2D & 3D GEOTOMO SOFTWARE, (July).
- [UNAL – Corantioquia] Universidad Nacional de Colombia - Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. (2004). Evaluación del Potencial Acuífero de los municipios de Santa Fé de Antioquia, Sopetrán, San Jerónimo, Olaya y Liborina, 331 p.
- [UNAL] Universidad Nacional de Colombia. (2000). Investigación de Aguas Subterráneas Región Valles de San Nicolás, Medellín. 22 p.
- Worthington, S. R. H., Davies, G. J., & Alexander, E. C. (2016). Enhancement of bedrock permeability by weathering. *Earth-Science Reviews*, 160, 188–202. Doi:10.1016/j.earscirev.2016.07.002

11. Anexos

Anexo 1

Informe primera salida de campo proyecto de grado, levantamiento de la línea base (Carpeta Anexos- archivo word).

Anexo 2

Informe segunda salida de campo proyecto de grado, adquisición de datos geofísicos (Carpeta Anexos- archivo word).

Anexo 3

Mapa proyecto de grado. Se encuentran los mapas Geológicos, Geomorfológicos, Topográficos, Localización de los SEV y TER, Localización área de estudio. (Carpeta Mapas proyecto de grado, archivos en PDF y JPEG).

Anexo 4

Datos crudos SEV, tomados de (UNAL-Corantioquia, 2004). Archivos en Excel

Anexo 5

Datos Crudos TER proyecto de grado (Carpeta datos crudos Ter, archivos en .DAT- Formato RES2DINV y .TXT- datos crudos suministrados por el software Geotest).

Anexo 6

Reinterpretación IPI2WIN (SEV). Carpeta con los SEV con archivos en .DAT – Formato IPI2WIN.

Anexo 7

Interpretación de los SEV y TER. (Documento en Word Interpretación SEV y TER-, presenta los resultados de la interpretación de los SEV y TER, Archivo JPEG- imágenes de la interpretación de las TER, Archivo en Excel- Reinterpretación de los SEV).